

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Flexibilní světlovod

Flexible lightguides

2018

Bc. Michal Hub

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Hub**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Flexibilní světlovod**
Flexible Lightguides

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Polymerní světlovody představují nové perspektivní materiály, které se používají zejména v automobilovém průmyslu. Zde slouží zejména pro vedení světla od výkonových zdrojů. Protože se nacházejí v náročných podmínkách, je nezbytné znát jejich vlastnosti pro různé podmínky. Realizujte měření na polymerových flexibilních světlovodech za následujících podmínek

- Využití světlovodu jako optického vlákna.
 - Přenos světla na konec světlovodu, kde bude sloužit jako zdroj např. pro reflektor.
 - Ověřit možnost změny barvy světla – např. modrý zdroj a bílý výstup.
 - Vyhodnoťte následující parametry a testy: Absorpce, posun vlnové délky.
- Mechanické testy: teplotní zatížení (změna optických vlastností na základě změny teploty okolí).

Seznam doporučené odborné literatury:

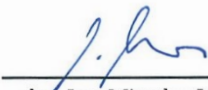
- [1] Saleh, B.E.A., Teich, M.C.: Fundamentals of Photonics. 2nd edition, John Wiley and Sons Inc. Hoboken, New Jersey, 2007, ISBN: 978-0-471-35832-9
- [2] Časopis Elektronik

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 23. dubna 2018


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultace při vytváření této diplomové práce, dále pak mé díky patří taktéž Mgr. Janu Jargusovi za spolupráci v laboratoři a za jeho zkušenosti s PDMS a luminofory. Taktéž bych rád poděkoval společnosti Varroc Lighting Systems s.r.o. za poskytnutí nezbytných prostředků potřebných k měření a taktéž za odborné konzultace. V neposlední řadě děkuji mé rodině, která mě v celém tomto snažení hluboce podporovala.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 23. dubna 2018

.....
podpis zástupce

Abstrakt

Cílem této práce je prozkoumat vlastnosti materiálu Polydimethylsiloxan (PDMS) vytvořit z něj světlovody konkrétních rozměrů a změřit a vyhodnotit tyto jeho vlastnosti jako je absorpce, teplotně optická stálost, ohybově útlumová závislost a spektrální závislost při průchodu světla tímto polymerem. Zhodnotit optické vlastnosti při těchto zátěžových měřeních. Dále pak zhotovit světlovody s vrstvou luminoforu na jejích koncích pro konverzi světla z modrého LED zdroje na bílý výstup a vyhodnocovat útlum, složení barevného spektra a teplotu chromatičnosti.

K této práci jsou potřeba výkonové LED čipy, integrační koule pro měření všech optických parametrů a vlastností výše zmíněných. Dále pak stavebnici Thorlabs pro upevňovací konstrukce všech prvků, potřebných k měření, materiál PDMS s příslušným tvrdidlem, laboratorní sklo a pomůcky pro manipulaci s PDMS a zdroj napájení. Ze softwaru pak GL Spectrosoft.

Klíčová slova

PDMS, fotometrie, luminofor, LED, kolorimetrie, světlovod, absorpce, spektrum, integrační koule, automobilový průmysl

Abstract

The aim of this work is to examine properties of material Polydimethylsiloxane (PDMS) and create light guides of specific dimensions to measure and evaluate these properties. Like absorption, thermal optical stability, attenuation dependence on bending, spectral dependence when the light passes through this polymer. Evaluate these optical properties during these stressmeasurements. Next step is to, make a light guide with a luminophore layer at its end to convert the blue LED source to the white output and evaluate the attenuation, color composition, and chromaticity temperature.

For this measuring is needed power LEDs, an integration sphere to measure all the optical parameters and properties of the above mentioned ones. Then, the Thorlabs kit for fasteners of all elements required for measurement, PDMS material with the appropriate hardener, laboratory glass and handling tools for manipulation with PDMS and power supply and GL Spectrosoft software.

Key words

PDMS, photometry, luminophore, LED, colorimetry, light guide, absorption, spectrum, integration sphere, automotive

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
λ	nm	Vlnová délka
c	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost světla
f	Hz	Frekvence
n	[-]	Index lomu
θ_1	°	Úhel dopadu paprsku na rozhraní
ϕ_c	°	Kritický úhel šíření
p	[-]	Fotoelastický koeficient
β_c	Pa^{-1}	Izometrická stlačitelnost
k	[-]	Boltzmanova konstanta
T_F	°	Fiktivní teplota
Φ	lm	Světelný tok
Φ_e	W	Zářivý tok
I_e	$W \cdot sr^{-1}$	Zářivost
M_e	$W \cdot m^{-2}$	Intenzita ozáření
L_e	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	Zář
I	cd	Svítivost
E	lx	Osvětlení
L	$cd \cdot m^{-2}$	Jas

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AlGaAs	Aluminium gallium arsenide
AlGaInP	Aluminium gallium indium phosphide
AlGaN	Aluminium gallium nitride
AlGaP	Aluminium gallium phosphide
AlInGaP	Aluminium indium gallium phosphide
AlN	Aluminium nitride
CCD	Charge-coupled device
CCT	Correlated Colour Temperature
CIE	Commission Internationale de l'éclairage
GaAs	Gallium arsenide
GaAsP	Gallium arsenide phosphide
GaN	Gallium nitride
GaP	Gallium phosphide
InGaN	Indium gallium nitride
LED	Light Emitting Diode
PC	Polykarbonát
PCB	Printed Circuit Board
PDMS	Polydimethylsiloxane
PMMA	Polymethylmethakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
RGB	Barevný model červená-zelená-modrá
YAG	Yttrito-hlinitý granát
YAG:Ce	Žlutý luminofor ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}_3$)

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam použitých zkratk.....	9
Úvod.....	13
1 Světlo jako elektromagnetické vlnění	14
2 Základy geometrické optiky	15
2.1 Postuláty geometrické optiky	15
2.2 Snellův zákon lomu.....	16
3 Světlovody.....	18
3.1 Použití světlovodů v automobilovém průmyslu.....	19
3.1.1 Světlovody s vyvazovací optikou.....	19
3.1.2 Světlovody jako přivaděče světla	20
3.2 Ohybové ztráty	22
3.2.1 Mikroohyby	22
3.2.2 Makroohyby	22
3.3 Rozptylové ztráty	22
3.3.1 Rayleighův rozptyl	23
3.3.2 Mieův rozptyl	23
3.4 Absorpční ztráty	24
3.5 Výpočet celkového útlumu a absorpce	25
4 Objektivní a subjektivní posuzování barev	26
4.1 Vjem barvy.....	26
4.2 Lidské oko.....	26
4.3 CIE XYZ - Kolorimetrie	27
4.4 Kolorimetrie v automobilovém průmyslu.....	29
4.5 Teplota chromatičnosti.....	30
5 Radiometrické a fotometrické veličiny	31
5.1 Radiometrické veličiny	31
5.2 Fotometrické veličiny	32
6 Technologie LED	33
6.1 Fyzikální podstata LED	33
6.2 LED diody emitující bílé světlo	34

6.2.1	Výkonové LED diody v automobilovém průmyslu	35
7	Polydimethylsiloxan (PDMS)	36
7.1	Chemické složení	36
7.2	Elastomer Sylgard	37
7.2.1	Sylgard 170.....	37
7.2.2	Sylgard 517.....	37
7.2.3	Sylgard 182 a 184.....	37
7.3	Typické a mechanické vlastnosti PDMS.....	38
7.4	Optické vlastnosti PDMS.....	38
8	Postup výroby světlovodů	39
8.1	Příprava směsi	40
8.2	Příprava forem.....	41
8.3	Výroba prvních kusů	42
8.4	Výroba finálních kusů	44
8.4.1	Zajištění tvarové stálosti světlovodů	44
8.4.2	Optimální metoda naplňování	45
8.4.3	Princip dostatečného vytvrzení.....	46
8.4.4	Konečná úprava vzorků	47
8.5	Světlovody s vrstvou luminoforu	49
9	Vlastní měření	50
9.1	Použité přístroje	50
9.1.1	Rohde & Schwarz HM8143	50
9.1.2	GL Spectis 1.0	51
9.2	Upevňovací konstrukce pro světlovody	52
9.3	Měření útlumu a spektrálního posuvu.....	54
9.3.1	Popis měřicího pracoviště.....	54
9.3.2	Výsledky měření - KR DMLN 31.23 – Červená LED	55
9.3.3	Výsledky měření - KY DMLN 31.23 – Oranžová LED.....	57
9.3.4	Výsledky měření – NCSW 170CT – Bílá LED.....	59
9.3.5	Shrnutí výsledků měření útlumu a spektrálního posuvu	61
9.4	Měření teplotních závislostí	62
9.4.1	Popis měřicího pracoviště.....	62
9.4.2	Výsledky měření - KR DMLN 31.23 – Červená LED	64

9.4.3	Výsledky měření - KY DMLN 31.23 – Oranžová LED.....	66
9.4.4	Výsledky měření – NCSW 170CT – Bílá LED.....	68
9.4.5	Shrnutí výsledků měření teplotních závislostí.....	70
9.5	Měření ohybových ztrát	71
9.5.1	Popis měřicího pracoviště.....	71
9.5.2	Výsledky měření - KR DMLN 31.23 – Červená LED	72
9.5.3	Výsledky měření – NCSW 170CT – Bílá LED.....	74
9.5.4	Shrnutí výsledků měření ohybových ztrát.....	76
9.6	Měření konverze modrého světla luminofory	77
9.6.1	Popis měřicího pracoviště.....	77
9.6.2	Výsledky měření s luminoforem na konci světlovodu	78
9.6.3	Výsledky měření s luminoforem na začátku světlovodu.....	80
9.6.4	Porovnání obou typů měření na vybraném vzorku.....	82
9.6.5	Shrnutí výsledků konverze modrého světla luminofory.....	83
Závěr		84
Použitá literatura		86
Seznam příloh.....		1

Úvod

V automobilovém průmyslu panuje již velmi dlouho přirozeně vysoká konkurence jednotlivých společností snažících se každým rokem přicházet k novým a novým inovacím, zajímavým řešením stávajících i nově nastávajících výzev spojených s velmi vysokými nároky. Tyto nároky mohou vycházet jak ze strany realizace s technologickými, materiálovými, bezpečnostně-předpisovými a jinými problémy, tak ze strany spotřebitelů s designovými či nákladovými ohledy.

Firma Varroc Lighting Systems s.r.o. je společností zabývající se částí odvětví v automobilovém průmyslu se zaměřením na osvětlovací prvky automobilů a jiných motorových prostředků. Ve spolupráci s VŠB-TUO se tato práce věnuje problematice prozkoumání široké škály vlastností poměrně nového materiálu zvaného Polydimethylsiloxan (dále jen PDMS). Tento materiál je znám svými příznivými opticky čistými vlastnostmi a ve spojení s velkou mírou flexibility a materiálové ohebnosti a teplotní vysoké stálosti by se mohl jevit jako zajímavý a perspektivní kandidát na nový materiál pro použití v automobilovém průmyslu. Například k výrobě různých optických prvků jako jsou třeba válcové světlovody pro vedení světla od výkonových zdrojů nacházející se často ve velmi těžkých podmínkách, a to jak teplotních, tak prostorově konstrukčních.

Tato práce se zabývá seznamováním se s vlastnostmi PDMS formou výzkumu výroby, zpracování a zhotovení válcových světlovodů k jejich využití jako optického vlákna a následné prověřování vlastností těchto světlovodů formou měření tohoto materiálu jako je jeho vnitřní absorpce, teplotně optická stálost, ohybově útlumová závislost a spektrální závislost při průchodu světla tímto polymerem.

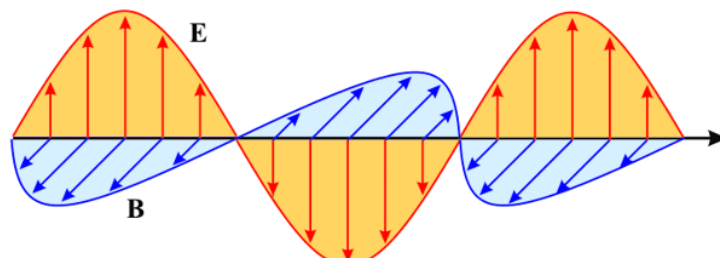
V první teoretické části se práce zabývá popisem světla jako elektromagnetického vlnění ve viditelném spektru. Věnuje se i základům geometrické optiky a taktéž popisuje princip a podmínky, za kterých se šíří světlo ve světlovodech. Popisuje způsob, jak pracuje lidské vidění a zabývá se významem a popisem kolorimetrie ve spojitosti s fotometrickými veličinami. Pozornost je poté věnována světelným zdrojům používaným v automobilovém průmyslu s důrazem na LED technologii. Následuje část věnována popisu luminoforů a jejich vlastností. Dále pak práce rozebírá problematiku PDMS materiálu, jeho jednotlivé druhy, aktuální využití s jeho tabulkovými vlastnostmi, chemickým složením a teoretickým postupem přípravy a výroby.

V druhé praktické části je věnována pozornost vytváření válcových světlovodů. Postupně probíhá zdokonalování a odlaďování výrobního postupu a procesu. S těmito vzorky následně probíhá měření vlastností světlovodů výše zmíněných s LED čipy jako zdroji světla a s profesionální integrační koulí jako detektorem.

Nakonec dochází k použití těchto vzorků pro aplikování vrstvy luminoforu na jejich konci a měření konverze světla modrého LED zdroje na bílý výstup na konci světlovodu. Zkoumá se jak velká vrstva luminoforu, jak ovlivňuje útlum, rozložení spektra a teplotu chromatičnosti světla na výstupu. Práce tedy popisuje a rozvíjí manipulaci PDMS materiálu, výrobu světlovodů a postupné zdokonalování výrobního procesu, odměření výstupů a vyvození závěrů.

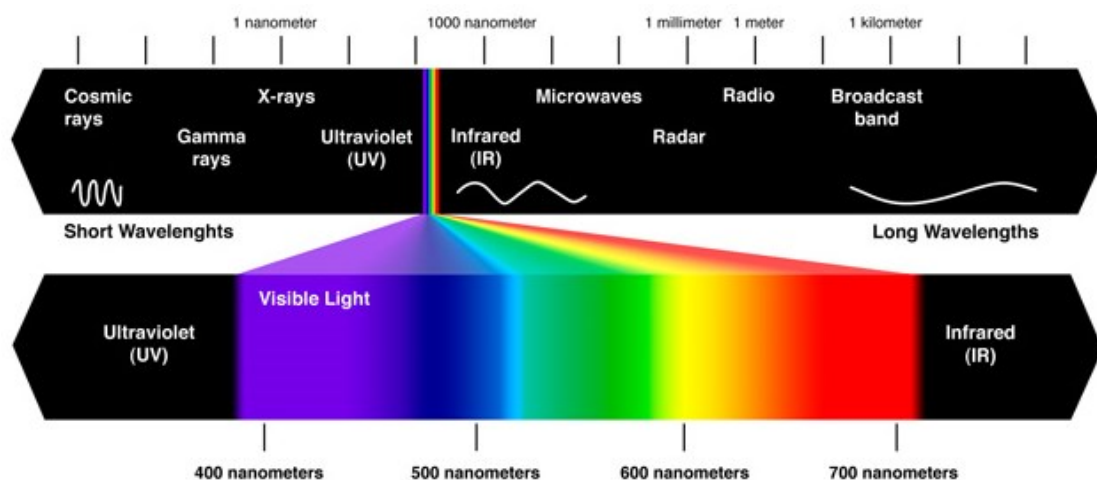
1 Světlo jako elektromagnetické vlnění

Světlo je z fyzikálního pohledu elektromagnetické vlnění popsané stejnými teoretickými principy, kterými se řídí všechny druhy elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření se šíří ve tvaru dvou navzájem spjatých vektorových vln, vlny intenzity elektrického pole „E“ a vlny pole magnetického s magnetickou indukcí „B“.



Obrázek 1.1: Znárodnění elektromagnetické složky světla [1]

Světlo je tedy elektromagnetické vlnění, které má velikost vlnových délek 380 nm – 790 nm, jak je znázorněno na obrázku 1.2. Rozsah těchto vlnových délek zachytíme lidským okem. Proto hovoříme o viditelném světle. Elektromagnetické vlnění, které má vyšší vlnovou délku se nachází v oblasti od infračerveného záření přes mikrovlny, rádiové vlny a dále, v případně nižší vlnové délky, než viditelné světlo označujeme elektromagnetické vlnění jako ultrafialové, rentgenové, gamma a kosmické.



Obrázek 1.2: Viditelné světlo v kontextu s celým elektromagnetickým spektrem [2]

Elementární pojmy související se světlem

- Světlo se šíří ve vakuu konstantní rychlostí $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$,
- Frekvence se značí (f) a udává počet kmitů za sekundu. Jednotkou je Hertz [Hz],
- Symbolem (λ) se označuje vlnová délka, která určuje vzdálenost, jež urazí vlna během jednoho kmitu (f) neboli jedné periody (T) podle následujících vztahů (1.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (1.1)$$

2 Základy geometrické optiky

Mnohé optické jevy je možné definovat skalární teorií, ve které světlo lze popsat pomocí jediné skalární funkce. Tento popis se nazývá skalární vlnová optika, častěji zjednodušeně vlnová optika. Pokud se světelné vlny šíří skrze předměty, jejichž rozměry jsou mnohem větší, než je vlnová délka, může být toto chování popsáno pomocí paprsků splňující geometrická pravidla. Tento popis je pak nazýván jako paprsková, či geometrická optika [3].

2.1 Postuláty geometrické optiky

- Světlo se šíří ve formě paprsků optickým prostředím a to tak, že paprsek si vždy vybere takovou trajektorii, aby urazil vzdálenost z bodu A do bodu B za co nejkratší možný čas. Paprsky jsou emitovány světelnými zdroji a mohou být pozorovány po dosažení optického detektoru.
- Optické prostředí je charakterizováno indexem lomu $n \geq 1$. Index lomu říká, kolikrát pomaleji se světlo pohybuje v daném prostředí, než ve vakuu, kde konstanta (c) je rychlost světla ve vakuu a hodnota (v) je rychlost světla šířícího se v jiném optickém prostředí (2.1).

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\lambda \cdot f} \quad (2.1)$$

- Výše uvedeny vztah je také označován jako absolutní index lomu a je charakteristický pro konkrétní optická prostředí a materiály. Je stanovován na základě měření s danou pevně definovanou vlnovou délkou, která prostředím prochází, jelikož index lomu není konstanta, ale s vlnovou délkou procházejícího elektromagnetického vlnění se mění.

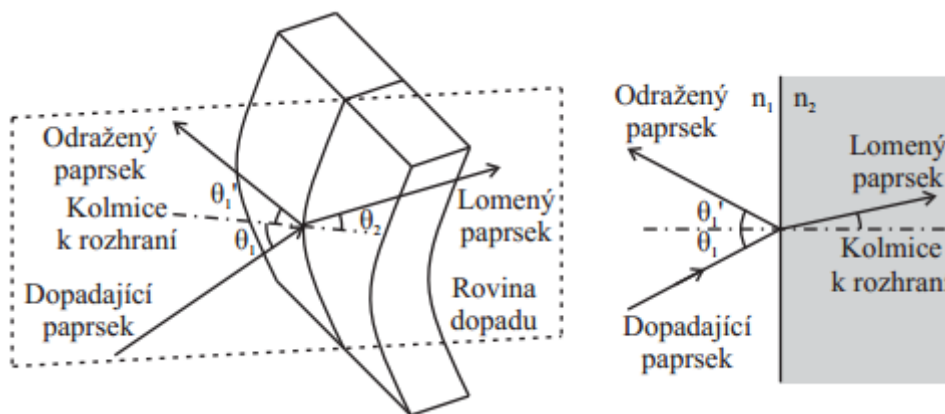
Tabulka 2.1: Indexy lomu vybraných optických prostředí

Optické prostředí	Index lomu
Vakuum	1
Vzduch	1,00026
Voda	1,33
Láh	1,36
Polydimethylsiloxan (PDMS)	1,42
PMMA	1,492
PC	1,584
Sklo	1,5 – 1,9
Diamant	2,42

Čím vyšší má materiál index lomu, tím je pro světelné paprsky obtížnější se z tohoto prostředí vyvazovat ven, proto nejlépe v sobě vážou světlo materiály s co nejvyšším indexem lomu.

2.2 Snellův zákon lomu

V případech, kdy světlo šířením dosáhne na rozhraní dvou prostředí, jeho následující trajektorie je závislá na těchto třech parametrech: indexu lomu prostředí, ze kterého se šíří n_1 dále pak na úhlu θ_1 pod kterým se šíří vzhledem ke kolmici k rozhraní a nakonec na indexu lomu druhého prostředí n_2 jak lze vidět na následujícím obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Odras a lom na rozhraní dvou optických prostředí [3]

Tento jev popisuje Snellův zákon lomu (2.2), v 17. století jej objevil nizozemský matematik a astronom Willebrord Snel van Royen. Jedná se o jeden ze základních zákonů geometrické optiky pro šíření elektromagnetického vlnění procházejícího z jednoho prostředí do druhého používaný dodnes.

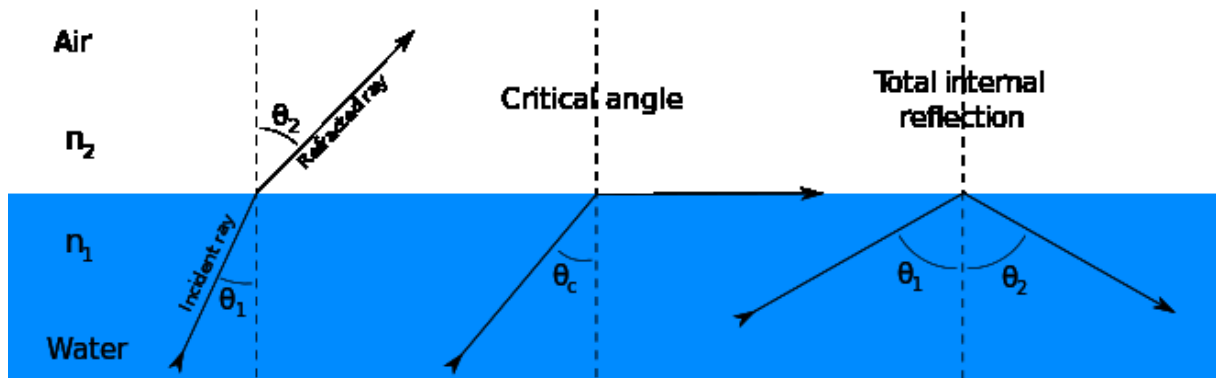
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

Když paprsek dosáhne rozhraní dvou prostředí, může se zachovat několika způsoby, jak lze vidět na obrázku 2.2. V každém z těchto případů se chování paprsků odvíjí od skutečnosti jak velký je jejich úhel, pod kterým se k rozhraní šíří, vzhledem ke kolmici k samotnému rozhraní. Pokud se odrazí zpět do výchozího prostředí, zlomí se ven a vyváže do druhého prostředí, nebo bude putovat přesně po rozhraní obou prostředí, závisí na tzv. kritickém úhlu ϕ_c , jež je popsán v následujícím vztahu (2.3).

$$\phi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3)$$

- Pokud paprsek putuje z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí $n_1 > n_2$, pod menším úhlem než je kritický, paprsek se zlomí ven do opticky řidšího prostředí směrem od kolmice.
- Pokud paprsek putuje z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí a $n_1 < n_2$, pod menším úhlem než je kritický, dojde k podobnému jevu jako u prvního případu s tím rozdílem, že se paprsek zlomí ven do opticky hustšího prostředí ovšem směrem ke kolmici.

- Pokud paprsek putuje z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí $n_1 > n_2$, pod stejným úhlem jako je kritický, jeho trajektorie se změní a to takovým způsobem, že bude putovat přesně v rozhraní těchto prostředí.
- Pokud ale paprsek putuje z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí $n_1 > n_2$, pod větším úhlem než je kritický, dochází k tzv. totálnímu odrazu uvnitř výchozího prostředí a celý paprsek se odrazí od rozhraní jako od zrcadla. V takovém případě se úhel dopadu rovná úhlu odrazu. $\theta_1 = \theta_2$.



Obrázek 2.2: Odras a lom na rozhraní vody a vzduchu [5]

3 Světlovody

V případech kdy jsme postaveni před úlohu přenést světlo z jednoho místa na druhé s co nejmenšími ztrátami, jedná se o případy, kdy pro tuto realizaci používáme optických prvků zvaných světlovody. Světlovod je optický element různých tvarů, který využívá odrazu světla a umožňuje pomocí odrazu paprsků šířit světlo uvnitř něj za splnění určitých podmínek. Z historického hlediska byly světlovody konstruovány jako duté válce zevnitř pokryty výrazně reflexním povrchem, které vedly denní či jiné světlo do vnitřních prostorů. Postupně byly rozměry světlovodů zmenšovány a začalo je být možné využívat i v dalších oblastech lidského života. Například v automobilovém průmyslu, může být vyroben jako plastový vylišaný kus pro přenášení světla z jednoho či více LED zdrojů. Existuje však spousta jiných variant využití ať už od ryze designových lamp v interiérech či z funkčního hlediska aplikace v optických sítích prostřednictvím optických vláken.

V této práci si je však pod pojmem světlovod nutno představit úzký dlouhý válec určitého průhledného, transparentního materiálu s co nejvyšším indexem lomu. Transparentností se v optice vyjadřuje průhlednost. Jedná se tedy o materiál, který má takové optické vlastnosti, který propouští světlo nebo jakékoliv jiné elektromagnetické záření za co nejmenších ztrát a zkreslení. V případě, kdy paprsek dosahuje rozhraní dvou transparentních prostředí, jež vykazují rozdílnou optickou hustotu, dochází k lomu nebo odrazu světla, vyjádřen indexem lomu obou prostředí.

Nejznámějším a nejzákladnějším transparentním materiálem je sklo, dále pak různé plasty, které mají v porovnání se sklem větší odolnost a cenovou dostupnost ale za tyto přednosti platí zhoršenými optickými vlastnostmi. V automobilovém průmyslu se nejčastěji používají kruhové nebo hříbkovité profily světlovodů, z důvodů jejich možnosti ovlivňovat výslednou distribuci světla. Nebývají výjimkou ani situace kdy je použito zcela libovolného profilu, který se navíc může v průběhu světlovodu měnit. Do takto zkonstruovaného světlovodu se z jednoho nebo více zdrojů vpouští světlo, které se pomocí vhodně navržených optických elementů vyvazuje do požadovaných směrů. Plocha, přes kterou se navazuje světlo do světlovodu, se nazývá čelo světlovodu.

Způsob, jakým se ve světlovodu vede světlo, spočívá v dodržení podmínky totálního odrazu ϕ_c . Po navázání světla do světlovodu paprsky putují uvnitř a odrážejí se na rozhraní, opticky hustšího prostředí s opticky řidším prostředím zpět do opticky hustšího, pokud splní podmínku totálního odrazu, podle vztahu (2.3).

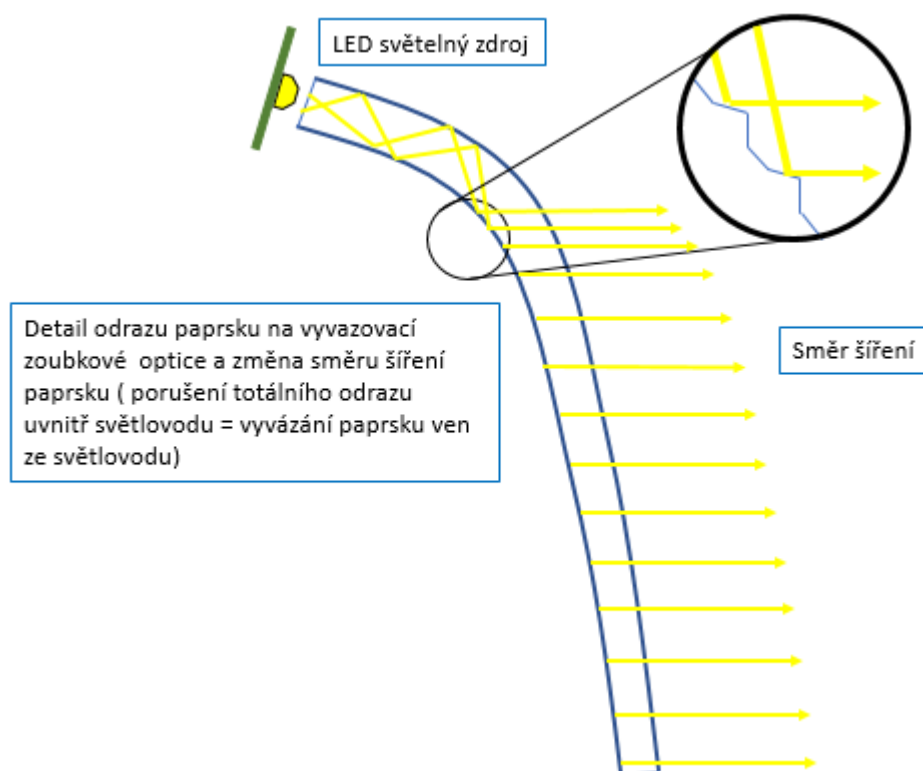
Po splnění podmínky totálního odrazu se veškerá energie světelného paprsku vrátí zpět do světlovodu a putuje takto dále. Pokud je porušena podmínka, paprsek je vyvázán ze světlovodu pryč. V automobilovém průmyslu má většina materiálů pro světlovody index lomu kolem hodnoty 1,5 a světlovod je obklopený vzduchem s indexem lomu, který je téměř roven 1.

3.1 Použití světlovodů v automobilovém průmyslu

Světlovody našly své uplatnění v mnoha oblastech lidského života a jedna z nich je také automobilový průmysl. V současné době se v automobilovém průmyslu používají světlovody v zásadě dvěma způsoby. Světlovody s vyvazovací optikou a světlovody používané jako přiváděče světla.

3.1.1 Světlovody s vyvazovací optikou

Jedná se o způsob, jak lze pomocí rovnoměrné a cílené porušování podmínky totálního odrazu podél celého světlovodu docílit distribuce světla ve formě úzkých křivkovitých signatur, které vytváří velmi poutavý dojem z designového hlediska. Tímto způsobem se podtrhují a zvýrazňují křivky moderních automobilů a jejich světel. Porušením totálního odrazu vedeného světla v těle světlovodu se dosahuje vyvazovací optikou. Ta je umístěna na zadní straně podél celého světlovodu a je tvořena sérií zoubků vystupujících ze světlovodu, nebo vrypů zasahujících dovnitř. Efekt vyvedení světla je u obou variant obdobný.



Obrázek 3.1: *Princip cíleného vyvazování světla*

V praxi je pak kladen velký důraz ne pouze na dodržení patřičné intenzity a distribuce světla podle předpisů daných signálních funkcí, ale zároveň se velmi dbá na homogenní vzhled. Tím se rozumí, co nejpodobnější intenzita světla ve všech oblastech světlovodu, bez vyhasínajících či přesvětlených částí a podobně. Tento typ světlovodu má v automobilovém průmyslu název light pipe.

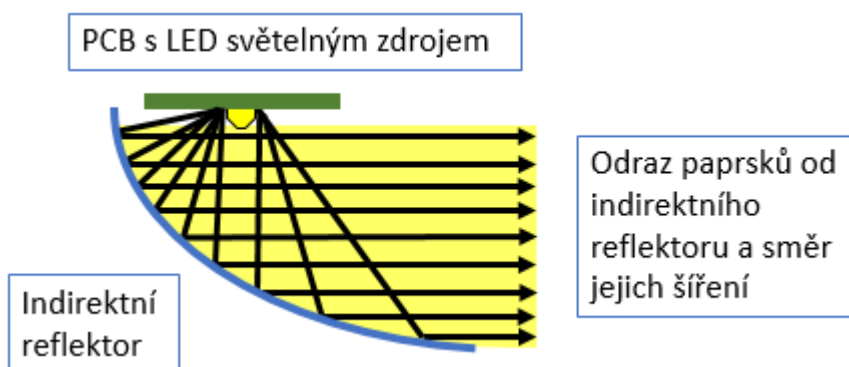
Tento typ světlovodu je například použit i na předním světlometu automobilu ŠKODA Karoq který vyrábí společnost Varroc Lighting Systems. Splňuje zde přední obrysovou funkci, funkci pro denní svícení a směrovou funkci.



Obrázek 3.2: *Light pipe, ŠKODA Karoq 2018*

3.1.2 Světlovody jako přiváděče světla

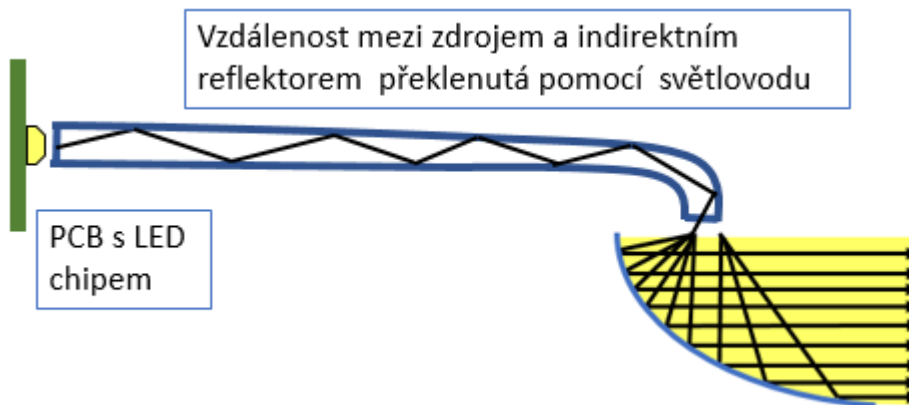
Pozornost je zde však převážně věnována světlovodům, které jsou používány jako přiváděče světla s podobným principem využití jako u optických vláken, kde je, mimo jiné, taktéž kladen důraz na co největší výstupní výkon. Standardně je výkonový zdroj světla ve formě LED čipu umístěn na desce plošných spojů (anglicky: Printed Circuit Board, dále jen PCB) a toto PCB je umístěno v bezprostřední blízkosti daného optického systému, který se stará o finální distribuci světla ven z automobilové lampy.



Obrázek 3.3: *Ukázka konstrukce reflektoru s LED zdrojem v ohnisku paraboly*

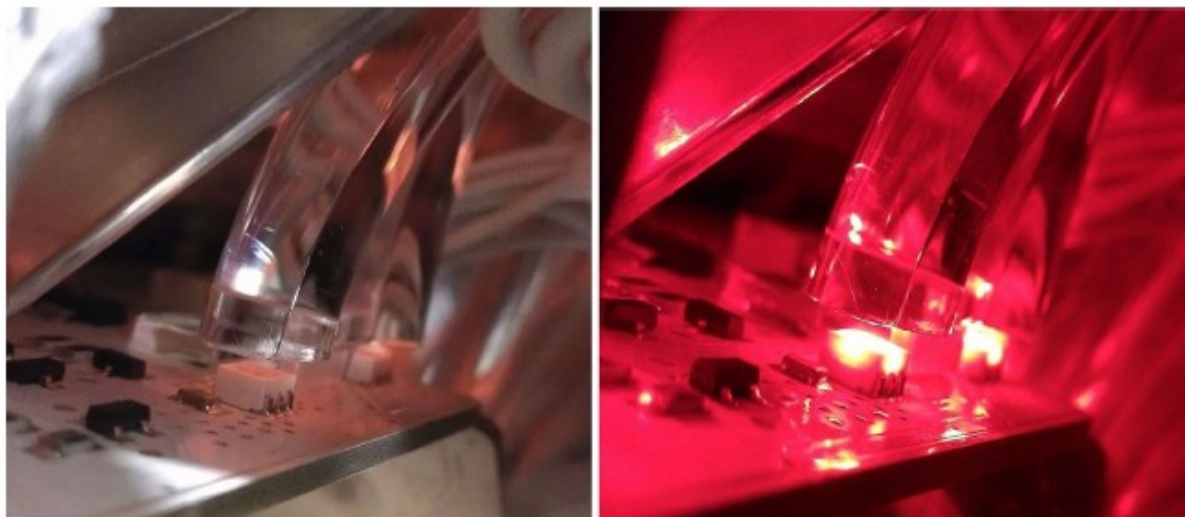
Indirektní reflektory se používají v automobilovém průmyslu se LED zdroji velmi frekventovaně.

Pokud není možné, ať z konstrukčních či teplotních důvodů, umístit výkonový zdroj světla standardním způsobem uvedeným výše, je nutné přivést světlo ze vzdáleného místa. Tuto úlohu mají taktéž za úkol provádět světlovody ovšem bez žádné vyvazovací optiky, protože v tomto případě jde o to, aby výkon na výstupu byl zatížen co možná nejmenšími ztrátami společně i s co nejmenšími změnami optických vlastností. Myšleny jsou optické vlastnosti, jako je například rozložení barevného spektra světla, či změna teploty chromatičnosti



Obrázek 3.4: *Způsob využití přiváděče světla*

Na následujícím obrázku 3.5 je možno vidět, jak celý koncept vedení světla vypadá v praxi. Jedná se o pohled do vnitřních částí zadní lampy Škody Octavia III, kde lze vidět bílé PCB, na kterém jsou umístěny LED zdroje emitující červené světlo. Přímě nad nimi se nacházejí světlovody, které rozsvěcují zadní obrysovou signální funkci lampy.



Obrázek 3.5: *ŠKODA Octavia III rozsvícený a nerozsvícený světlovod [4]*

Reálné světlovody vykazují vlivem použitého materiálu a nedokonalostmi při výrobě útlum. Ztráty výkonu ve světlovodech můžeme rozdělit na geometrické a materiálové. V praxi útlum znamená zmenšení optického výkonu na výstupu světlovodu, vzhledem k vstupnímu výkonu, který byl do světlovodu navázán. K tomuto jevu dochází při průchodu světla světlovodem hned z několika důvodů. V této práci je kladen důraz na útlum způsoben ohybovými ztrátami, rozptylem a absorpcí světla v materiálu.

3.2 Ohybové ztráty

Podobně jako v optických vláknech tak i zde můžeme rozdělit ohybové ztráty na mikroohyby a makroohyby. Oba tyto jevy nastávají vlivem geometrických příčin při putování paprsků světla materiálem. Ztráty způsobené ohybem jsou spektrálně závislé a to tak, že s rostoucí vlnovou délkou vedeného světla uvnitř je světlovod na ohyby náchylnější.

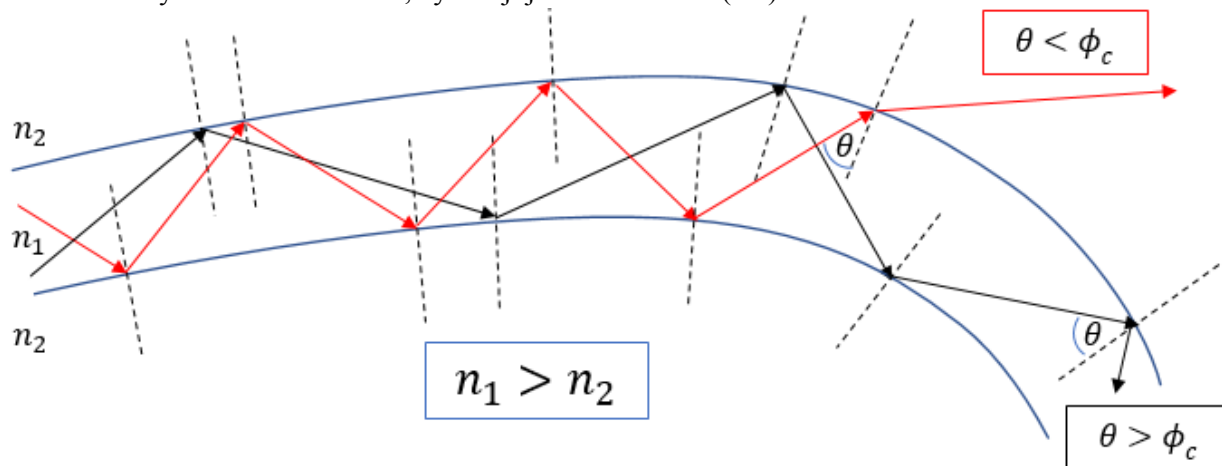
3.2.1 Mikroohyby

V našem případě k mikroohybům dochází pouze na povrchu světlovodů, jelikož nejsou složeny jako optická vlákna z jádra a pláště ale z tohoto pohledu se skládají pouze z jádra. Jde o ohyby, které jsou svou velikostí i výrazně menší než je průměr světlovodu.

Dochází k nim, pokud povrch světlovodu není kvalitně zpracovaný a hladký. Pokud však není zanedbán způsob výroby, či není použita nekvalitní forma pro vylití či vylisování, mají tyto ohyby marginální vliv na útlum optického výkonu.

3.2.2 Makroohyby

Z našeho pohledu jsou mnohem zajímavější makroohyby. K nim dochází v případech, kdy se světlovod už přímo navrhne a vyrobí tvarově zaoblený, např. z pevného plastu nebo je vytvořen z flexibilních např. silikonových materiálů a k ohybům dochází sekundárně poté. Se zvětšujícím se poloměrem ohybu postupně narůstá i množství paprsků, které nedodrží pravidlo totálního odrazu a v místech ohybu se ze světlovodu, vyvazují jako na obrázku (3.6).



Obrázek 3.6: Červený paprsek vlivem ohybu opouští světlovod

Pokud poté nejsou externími, geometrickými činiteli vně světlovodu odraženy a navázány zase zpět, dochází k jejich definitivní ztrátě a tedy k nárůstu útlumu.

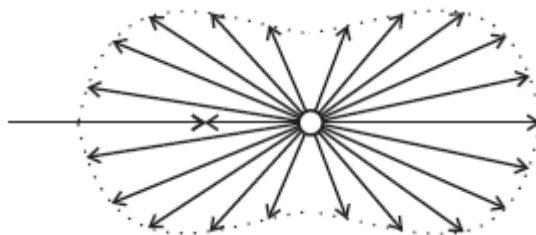
3.3 Rozptylové ztráty

Doposud byla věnována pozornost problémům, které byly spojeny s odklonem paprsků vlivem zakřiveného rozhraní. A pouze s tímto bychom si byli vystačili v případě, že by byl materiál, ze kterého je vytvořen světlovod, dokonale homogenní. Tento předpoklad se však neslučuje s realitou. Ve skutečnosti nelze dosáhnout dokonale homogenního prostředí, protože nehomogenity jsou představovány i těmi nejmenšími změnami indexů lomu v materiálu. I ty nejkvalitněji zpracované materiály se nezbaví naprosto všech nehomogenit, protože mírné změny v indexu lomu vyvolávají

kmity krystalové mřížky vlivem teploty nebo nedokonalosti v depozicích částic. Na takovýchto nehomogenitách dochází ke změnám ve směru šíření paprsků, tedy dochází k jejich rozptylu.

3.3.1 Rayleighův rozptyl

Rayleighovy rozptylové ztráty jsou způsobeny nečistotami a nehomogenitami v indexu lomu materiálu rozměrově malými vůči vlnové délce světla. Rozptyl na těchto nečistotách a nehomogenitách je všesměrový. Míru rozptylu lze zmírnit kvalitnější technologií výroby světlovodu, čímž lze dosáhnout snížení množství nečistot v materiálu, nehomogenity však z principu odstranit nelze [7].



Obrázek 3.7: *Distribuce paprsku po Rayleiově rozptylu [3]*

Příspěvek Rayleighova rozptylu k celkovému útlumu světlovodu lze vyjádřit pomocí vztahu pro výpočet koeficientu Rayleighova rozptylu (3.1), kde (λ) je vlnová délka světla, (n) je index lomu materiálu světlovodu, (p) je fotoelastický koeficient materiálu světlovodu, (β_c) je izometrická stlačitelnost, (k) je Boltzmannova konstanta a (T_F) fiktivní teplota, při které je dosaženo tepelné rovnováhy [7].

$$\gamma_R = \frac{8\pi}{3\lambda^2} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot k \cdot T_F \quad (3.1)$$

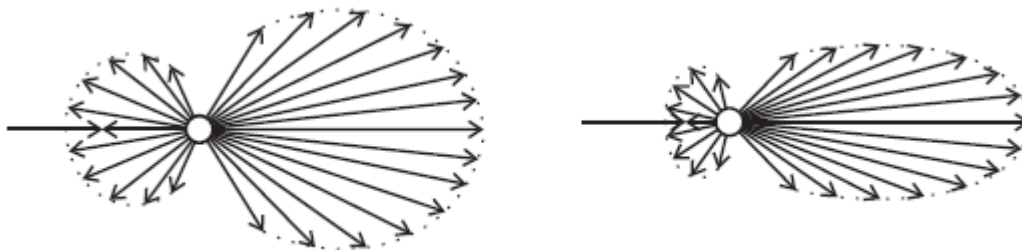
Velikost rozptylu tedy značně ovlivňuje pracovní vlnová délka, vyšší vlnové délky přinášejí úbytek Rayleighova rozptylu [7].

3.3.2 Mieův rozptyl

Tento rozptyl vzniká na nehomogenitách, které jsou rozměrově podobné nebo větší, než je pracovní vlnová délka, jeho velikost je úhlově závislá. Způsobeny jsou především nedokonalým promísením a zpracováním, mikrotrhlinami a mikrobublinami v materiálu.

V roce 1908 Mie studoval rozptyl světla na dielektrických vrstvách o velikosti srovnatelnou s vlnovou délkou dopadajícího světla. Při pokusech pozoroval asymetrii mezi přímými a zpětnými směry rozptylu. Pro velké částice dominoval přímý směr, v přímém směru se vytvoří velký přední lalok, postranní laloky jsou malé. Pokud je velikost částic menší než vlnová délka světla, pak se zpětný lalok

zvětší a postranní vymizí, V případě, že velikost částic dosahuje 10% vlnové délky světla, přední a zpětný lalok jsou symetrické [3].



Obrázek 3.8: *Mieův rozptyl – vlevo velikost částic větší než vlnová délka, vpravo menší [3]*

3.4 Absorpční ztráty

V základních interakcích záření a látek figurují pojmy jako energie fotonu a pásová struktura pevných látek. Pevné látky, zejména izolanty a polovodiče, jsou popsány pásy dovolených a energetických stavů valenčních elektronů a tyto pásy jsou odděleny pásem zakázaných energií. Elektrické a optické vlastnosti těchto materiálů jsou určeny tvary pásů a zejména šířkou zakázaných energií ΔE . Elektrony se mohou vyskytovat pouze v pásích dovolených energií (valenčním a vodivostním). Protože jsou však oba pásy odděleny zakázaným pásem energií, musí elektron ve valenčním pásu obdržet energii, aby byl schopen přechodu do vyššího energetického pásu. Minimální množství energie, které elektron musí získat, je rovno šířce zakázaného pásu. Na procházející paprsky ve světlovodu se můžeme dívat jako na soubor fotonů, které se šíří ve směru popsaném paprskem světla a každý foton má energii. Ta závisí na vlnové délce a je popsána jednoduchou relací, [8] kde (h) je Planckova konstanta (c) je rychlost světla ve vakuu a (λ) je vlnová délka daného světla (3.2).

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.2)$$

Pokud bude mít foton vhodnou vlnovou délku, která určí jeho energii tak, že bude platit $E_f \geq \Delta E$, pak bude tento foton absorbován v materiálu.

Z výše uvedeného plyne, že materiály mají přírodní povahu a jejich strukturu energetických stavů (pásů) nemůžeme měnit. Jediné, co můžeme ovládat, je vlnová délka procházejícího světla, tedy můžeme vybírat, jakou energii budou mít jednotlivé fotony procházející optickým světlovodem. Jinými slovy řečeno, ovládat absorpci znamená buď vybírat vhodné materiály tak, aby šířka zakázaného pásu energií byla větší než energie, kterou si nesou fotony světla nebo pro daný materiál volit takové vlnové délky, aby energie fotonů s nimi spojená byla menší, než je šířka zakázaného pásu energií materiálu [8], čímž nedojde k absorpci a vyhneme se ztrátě výkonu.

3.5 Výpočet celkového útlumu a absorpce

Pro vyjádření ztrát optického výkonu se používá logaritmická stupnice. Poté místo ztrát uvádíme označení útlum a jeho jednotku pak představuje decibel (dB).

Celkové výkonové ztráty světlovodů jsou dány podílem vstupního výkonu P_{in} a výstupního výkonu P_{out} . Výsledný útlum pak určuje tento vztah (3.3).

$$A = -10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (3.3)$$

Jelikož je ale přehlednější znát celkový útlum vztažený k určité délce světlovodu (l), počítá se i tzv. měrný útlum (a) podle vztahu (3.4). V případech kdy máme několik různě dlouhých světlovodů, jejich kvalitu rozeznáme podle měrného útlumu okamžitě.

$$a = \frac{A}{l} \quad (3.4)$$

Způsob jakým ve světlovodech lze spočít absorpci jde vidět ve vztahu (3.5) respektive vztahu (3.6). Symbolem P_{out} se značí znovu množství světla vystupujícího ze světlovodu, symbolem P_{in} se znovu značí množství světla vstupujícího do čela světlovodu. Symbolem (L) se značí délka světlovodu a (α) představuje absorpční koeficient.

$$P_{out} = P_{in} \cdot e^{-\alpha \cdot L} \quad (3.5)$$

$$\alpha = - \frac{\ln \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)}{L} \quad (3.6)$$

Absorpční koeficient vyjadřuje schopnost látky absorbovat světlo, respektive elektromagnetické záření. Čím nižší je hodnota (α) tím daný materiál absorbuje světlo méně. Se zvyšujícím se absorpčním koeficientem dochází k větší absorpci světla v materiálu. Z rovnice (3.5) lze vyvodit, že absorpce světla roste s délkou světlovodu exponenciálně. Aby se docílilo co nejnižší ztráty světla, musí se světlovod vyrobit tak, aby byl co nejkratší a z materiálu, u kterého je absorpce světla v pásmu propustného záření zanedbatelně malá.

4 Objektivní a subjektivní posuzování barev

Existuje celá řada způsobů jak vnímat viditelné světlo, jeho intenzitu, barvy a odstíny. Snímačem v tomto ohledu může být jak lidské oko, tak nepřeborné množství detektorů na bázi CCD elektronických součástek, spektrometrů a podobně.

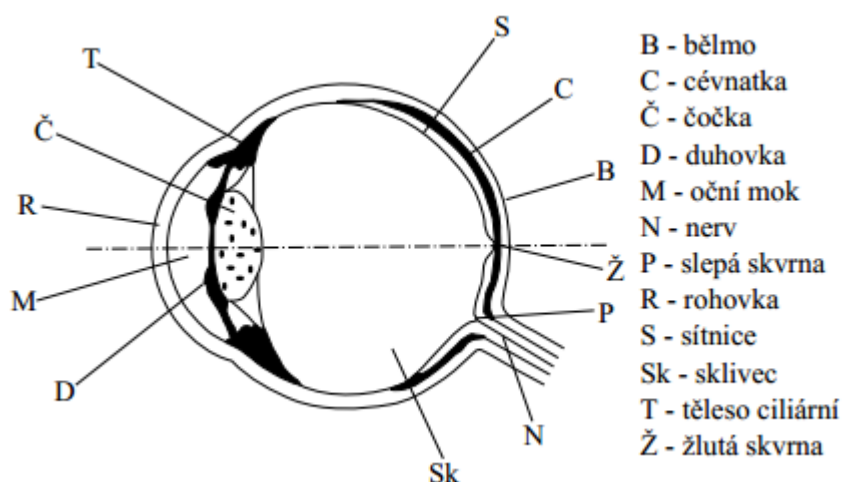
4.1 Vjem barvy

Pojem barva, přesněji řečeno vjem barvy, označuje vlastnost zřakového počítku, která umožňuje pozorovateli zjistit rozdíl mezi dvěma ploškami zorného pole, které mají stejnou velikost, tvar i strukturu, přičemž tento rozdíl má stejnou povahu jako rozdíl, který by vznikl změnou spektrálního složení světla. Pojem barva tedy patří do oblasti vjemové (psychosenzorické).

Běžně se však pojem barva přenáší i na vlastnost světla a předmětů a hovoří se o barvě světla nebo o barvě předmětů. Přesněji se však barevné vlastnosti světla označují názvem chromatičnost a barevné vlastnosti předmětů pojmem kolorita. Tyto vlastnosti lze jednoznačně vyhodnotit fyzikálně podle spektrálního složení barevného podnětu a spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek. Chromatičnost je určena spektrálním složením záření vysílaného primárním zdrojem. Kolorita je určena spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího sledovaný předmět a spektrální odrazností či propustností materiálu předmětu. Chromatičnost a kolorita jsou proto pojmy psychofyzikální [6].

4.2 Lidské oko

Jedná se o velmi složitý orgán, kterým jsme schopni vnímat viditelné světlo. Je to také velice důmyslný biologický detektor. Skládá se z mnoha částí, ale optickou soustavu oka tvoří rohovka R, oční mok M, čočka Č a sklivec Sk [3].

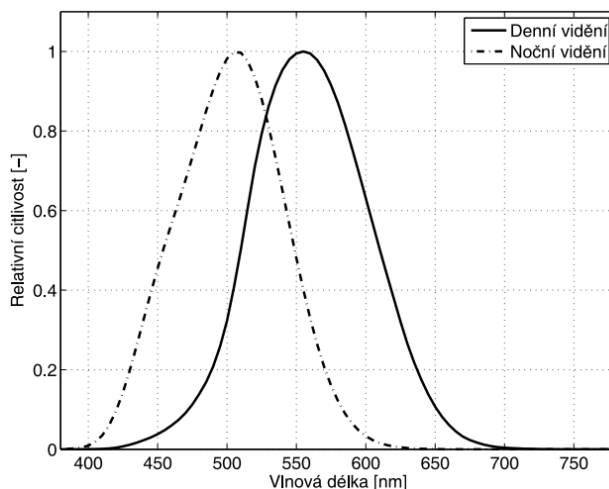


Obrázek 4.1: Struktura lidského oka [3]

Zřakový vjem vzniká tak, že paprskové svazky přicházející do oka z vnějších předmětů se spojují optickou soustavou oka na sítnici, kde se setkávají s citlivými buňkami. V sítnici jsou uloženy dva druhy buněk citlivých na světlo: tyčinky a čípky. Tyčinky vykazují citlivost na světlo, ale všechny druhy barev vnímají jako šedomodré. Citlivost čípků na světlo je menší, ale právě čípky rozeznávají

barvu světla. Tyčinky a čípky nejsou na sítnici rovnoměrně rozloženy, ve žluté skvrně převládají čípky a dále odtud přibývají tyčinky. Oko vždy zaujímá takovou polohu, aby obraz nejdůležitějších částí předmětu padl na žlutou skvrnu. Oko si samo řídí světelný tok dopadající na oko stahováním nebo rozšiřováním duhovky, takže oční pupila má za různých okolností různý průměr. Nejmenší průměr 2 mm má při velké intenzitě, při malé intenzitě je to až 8 mm [3].

Oko nemá stejnou citlivost na všechny barvy, nejcitlivější je na žlutozelené světlo o vlnové délce $\lambda = 555$ nm pro denní (fotopické) vidění. Pro noční (skopické) vidění je lidské oko nejcitlivější na vlnovou délku $\lambda = 507$ nm [3], což odpovídá přibližně azurové barvě.



Obrázek 4.2: Spektrální citlivost lidského oka [3]

4.3 CIE XYZ - Kolorimetrie

Roku 1931 mezinárodní komise pro osvětlování Commission internationale de l'éclairage, zkráceně CIE, akceptovala pět doporučení, která položila jako základ pro moderní měření barevnosti. CIE 1931 doposud tvoří základ matematického a fyzikálního a především objektivistického vyjádření barvy. Tato studie vychází z CIE RGB. Definice barev podle CIE 1931 se skládá podle X, Y, Z parametrů. Jas je vyjádřen hodnotou Y a barvy s tímto jasnem jsou uspořádány v chromatickém diagramu (x, y). Odstíny jsou rozloženy podél obvodu diagramu, sytost se za pohybu mění směrem k centrální neutrální oblasti. Barvy se stejným odstínem leží na přímce spojující bod na obvodu trojúhelníku a bod odpovídající bílé barvě. V tomto zobrazení není znázorněna světlost. Tyto odvozené parametry je možné dopočítat z trichromatických složek x, y, a z, podle následujících vztahů, které jsou nazývány jako barevné souřadnice a jsou definovány takto:

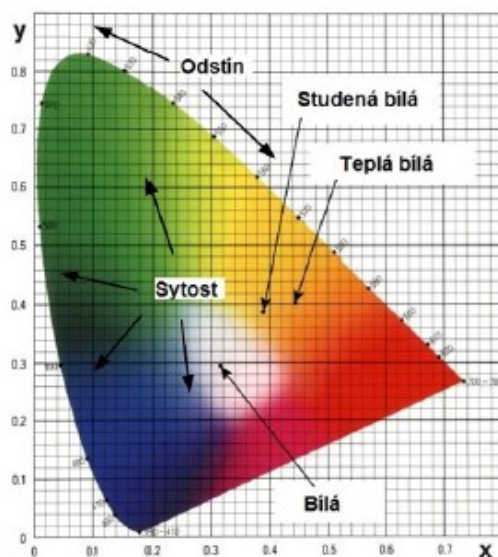
$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (4.1)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (4.2)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (4.3)$$

$$x + y + z = 1 \quad (4.4)$$

Výrobci při klasifikaci LED do barevných binů, uvádějí v katalogových listech souřadnice x a y , které se vztahují na barevný dvourozměrný prostor CIE xy , což je jednotkový trojúhelník XYZ promítnutý do roviny XY [4].



Obrázek 4.3: Chromatický diagram CIE 1931 [4]

Další hodnota v katalogové dokumentaci je světelný tok, což v CIE 1931 představuje parametr Y . Pro získání kompletních souřadnic Y , X a Z parametrů uvedených v katalogové dokumentaci je možné využít následující vztahy.

$$X = x \frac{Y}{y} \quad (6.5)$$

$$Y = \phi \quad (6.6)$$

$$Z = \frac{Y}{y} (1 - x - y) \quad (6.7)$$

Hodnoty x , y představují souřadnice odpovídající vybranému bodu v barevném prostoru CIE 1931 na obrázku 4.3 a ϕ prezentuje hodnotu světelného toku. Pro názornou ukázkou byla zvolena žlutá výkonová LED, která je použita při měření v praktické části.

Tabulka 4.1: Jednotlivé parametry vybrané výkonové LED

Název výkonové LED	Synios - žlutá
Typ výkonové LED	KY DMLN 31.21
Úhel svítivosti	120°
Světelný tok	28 lm
Dominantní vlnová délka	599 nm
CIE – x souřadnice	0,5705
CIE – y souřadnice	0,4289

Hodnoty X, Y, Z lze matematicky spočítat podle předchozích vztahů následovně.

$$X = 0,5705 \frac{28}{0,4259} = 37,506$$

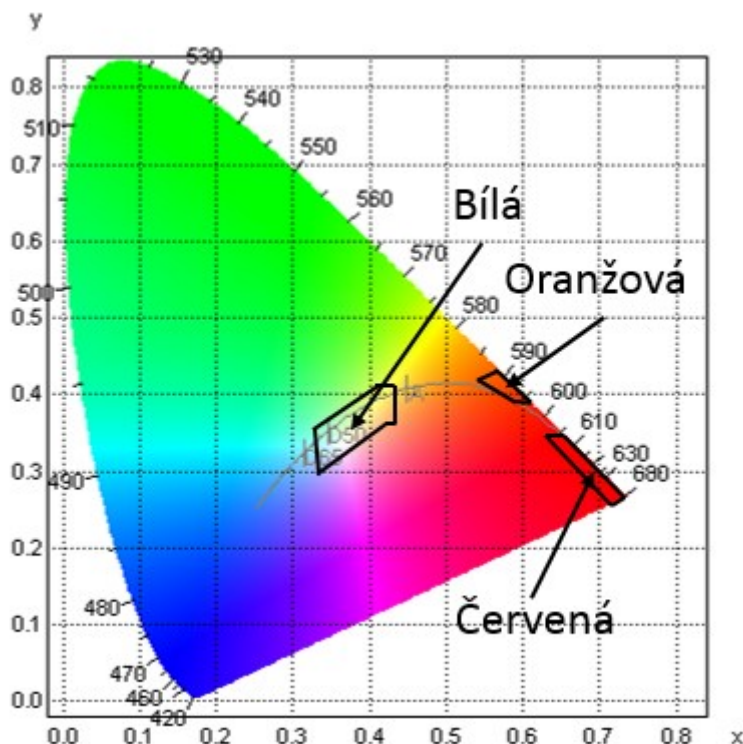
$$Y = 28$$

$$Z = \frac{28}{0,5705} (1 - 0,5705 - 0,4289) = 0,029$$

Převod těchto katalogových parametrů na parametry normy CIE 1931 je z hlediska kombinace několika LED z různých barevných binů velmi důležité. Většina mezinárodních norem, které pojednávají o zdrojích světla pro automobilový průmysl, používají při definování barev zdrojů právě normu CIE 1931, avšak odvolávají se pouze na barevné souřadnice x a y [4].

4.4 Kolorimetrie v automobilovém průmyslu

Je přirozené, že v automobilovém průmyslu není dovoleno používat pro světelné funkce výkonové zdroje jakýchkoliv barev. V tomto ohledu jsou podle předpisů povoleny světelné zdroje, které smí emitovat světlo shodné pouze z některými oblastmi chromatického diagramu CIE 1931, jak lze vidět v následujícím obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Oblasti povolených barevných odstínů v automobilovém průmyslu

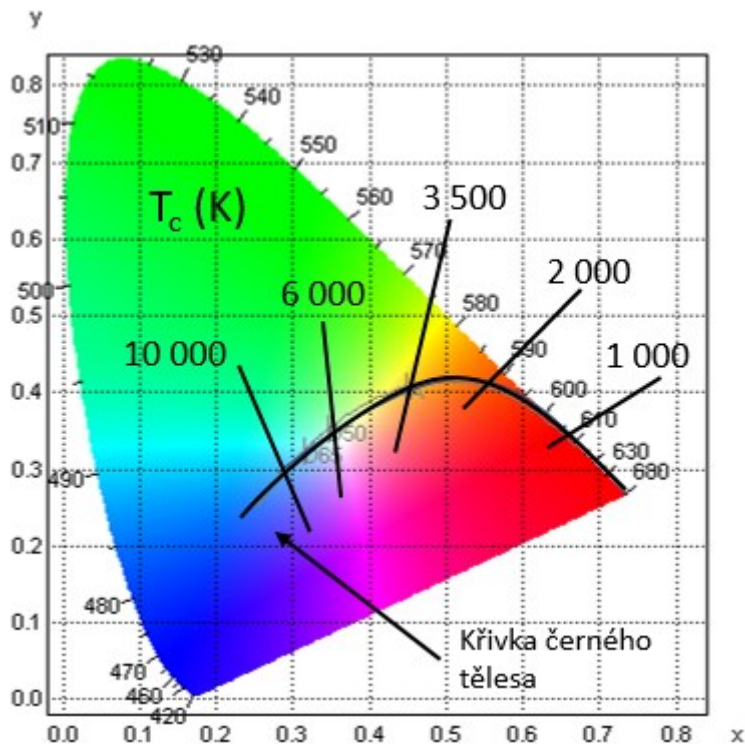
Jednotlivé barevné zdroje se poté volí na základě toho, pro jakou funkci budou použity a musí zapadat do definovaných, výše určených oblastí.

- **Bílé zdroje** – používají se především v předních automobilových lampách jako zdroje pro obrysové funkce, funkce pro denní svícení, dálková světla a přední mlhová světla či v zadní části automobilu pro couvací osvětlovací funkci.
- **Oranžové zdroje** – nachází své využití v předních i zadních automobilových lampách jakožto směrové signální funkce.
- **Červené zdroje** – používají se pouze v zadních automobilových lampách k plnění zadní obrysové funkce, brzdové funkce a zadních mlhové funkce.

4.5 Teplota chromatičnosti

Kromě barvy a odstínu lze objektivně popsat světlo na základě teploty chromatičnosti. Barevná teplota, jak se taktéž označuje, má i zkrácené označení (odvozeno z anglického názvu: Correlated Colour Temperature) CCT. Tato fyzikální veličina popisuje v barevném spektru, jak se především bílé světlo jeví pro pozorovatele. Pokud v sobě skýtá tóny žlutých, či oranžových barev, říkáme, že jde o světlo teplé barvy. Pakliže v sobě bílé světlo obsahuje složky azurových až modrých barev, říkáme, že světlo má studenou barvu.

Teplota chromatičnosti se měří v kelvinech (K). Světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané černým tělesem, zahřátým na tuto teplotu. Černé těleso je teoretický předmět, který absorbuje veškeré elektromagnetické záření, které na něj dopadá. Zdá se černé, protože neodráží světlo. Jakmile je ale černé těleso zahříváno, jeho barva se postupně změní z černé na červenou a postupně až do modré. Změna barevných souřadnic tohoto spektra barev definuje křivku černého tělesa v barevném prostoru CIE 1931 na obrázku 4.5.



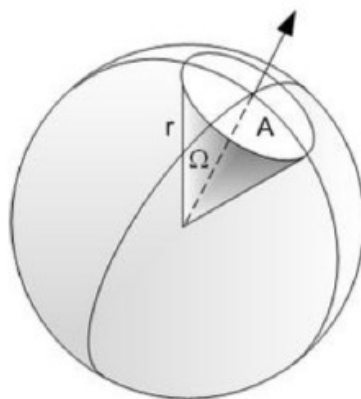
Obrázek 4.5: Křivka teploty chromatičnosti

5 Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrii je možno popsat jako část optiky, která se zabývá měřením veškerého elektromagnetického záření. Radiometrie používá absolutní veličiny, zatímco fotometrie studuje obdobné veličiny, ovšem jen z hlediska viditelného spektra tedy z hlediska působení na zrakový vjem.

5.1 Radiometrické veličiny

- **Zářivý tok** Φ_e představuje energii vyzářenou zdrojem za jednotku času. $\Phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ je vztah, kterým je určen, kde ΔE je energie vyzářena zdrojem za čas Δt . Jednotkou je Watt [W].
- **Zářivost** I_e je definována jako podíl zářivého toku Φ_e a velikosti prostorového úhlu $\Delta\Omega$, do kterého je tento tok vyzařovaný. Vztah je $\Delta E I_e = \frac{\Phi_e}{\Delta\Omega}$ jednotkou je watt na steradián [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$].
- **Intenzita ozáření** M_e je definována jako podíl zářivého toku $\Delta\Phi_e$, který je vysílán z plochy zdroje o plošném obsahu ΔS . Se vztahem $M_e = \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta S}$. Jednotku představuje watt na metr čtverečný [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].
- **Zář** L_e je určena podílem zářivostí I_e elementární plošky zdroje ve volném směru $\Delta\Omega$ a kolmého průměru plošky $\Delta S \cos \alpha$ v tomto směru. Je určena vztahem $L_e = \frac{I_e}{\Delta S \cos \alpha \cdot \Delta\Omega}$. Jednotkou je watt na steradián na metr čtverečný [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] [3].
- **Prostorový úhel** je část prostoru ohraničená rotační kuželovou plochou. Vyjadřuje poměr mezi plochou vytyčenou kuželem na povrchu koule (A) ke kvadrátu poloměru dané koule (r). (5.1)



Obrázek 5.1: Vizualizace prostorového úhlu [4]

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (5.1)$$

Tento poměr je pro dan kužel neměnný (zmenší se poloměr, zmenší se i vytyčená plocha). Jednotkou je steradián [sr] a označuje se řeckým písmenem Ω [4].

5.2 Fotometrické veličiny

- **Světelný tok Φ** představuje množství energie procházející danou plochou za jednotku času. Jednotkou je lumen [lm].
- **Svítivost I** udává prostorovou hustotu světelného toku Φ zdroje v různých směrech. Svítivost lze určit pouze pro bodový zdroj. Jednotkou je [cd].
- **Osvětlení E** je určeno částí světelného toku $\Delta\Phi$, který dopadá kolmo na plochu obsahu ΔS . Jednotkou je lux [lx].
- **Jas L** je určen podílem svítivosti I elementární plošky ve zvoleném směru $\Delta\Omega$ a kolmého průmětu plošky $\Delta S \cos \alpha$ v tomto směru. Jednotkou je nit [nt] nebo $[cd \cdot m^{-2}]$ [3].

Tabulka 5.1: *Souhrn radiometrických a fotometrických veličin*

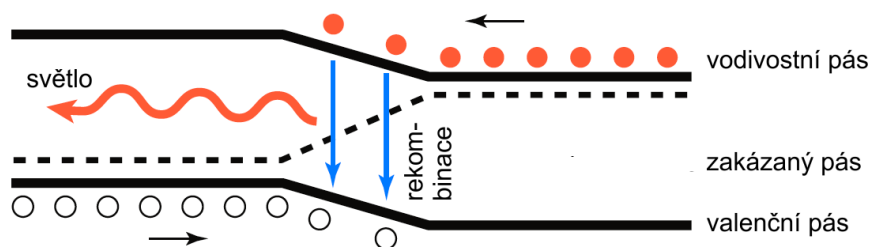
Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
Zářivý tok Φ_e	W	Světelný tok Φ	lumen (lm)
Zářivost I_e	$W \cdot sr^{-1}$	Svítivost I	kandela (cd)
Intenzita ozáření M_e	$W \cdot m^{-2}$	Osvětlení E	lux (lx)
Zář L_e	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	Jas L	nit (nt) / $cd \cdot m^{-2}$

6 Technologie LED

LED diody (light emitting diode) obecně fungují na principu elektroluminiscence. To znamená, že se vhodný elektroluminiscenční materiál vloží do elektrického pole. Elektrické pole vybudí nosiče náboje, která svou energií posléze odevzdají pomocí záření.

6.1 Fyzikální podstata LED

Princip činnosti LED diody je založen na zářivé rekombinaci elektronu s dírou. Pokud připojíme napětí na PN přechod v propustném směru, majoritní nosiče se stanou schopnými překonat zakázané pásmo a dostávají se do polovodiče opačné vodivosti, kde se stávají minoritními. Díky tomuto vzniká nerovnovážný stav a nastává rekombinace elektronů s děrami, v důsledku které se energie elektronů procházejících přes zakázaný pás (zvaný též aktivní zóna) mění na energii záření. Na šířce zakázaného pásu je potom závislá vlnová délka vydávaného záření [9].



Obrázek 6.1: Rekombinace elektronů s děrami za vzniku světla [15]

Záleží tedy na vhodné volbě materiálu, z kterého je LED dioda vyrobena. Materiál poté definuje, jakou vlnovou délku světla bude dioda emitovat, což znamená, jakou barvou bude svítit.

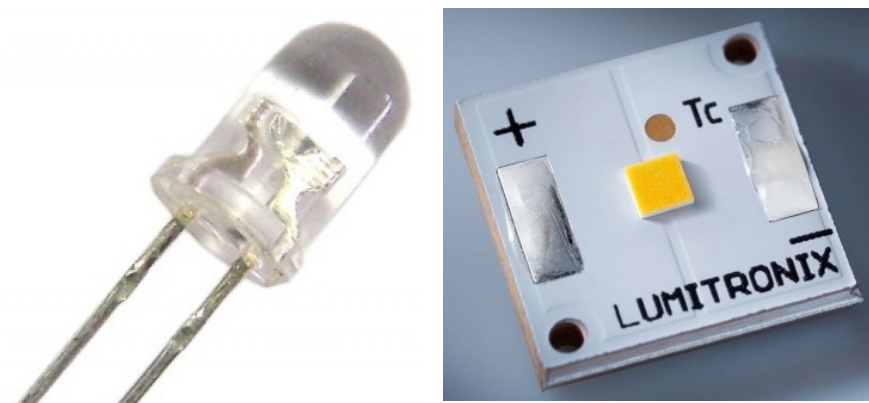
Tabulka 6.1: Materiály pro výrobu LED diod

	Materiál	Barva světla	Vlnová délka [nm]	Napětí [V]
	GaAs, AlGaAs	Infračervená	> 760	< 1,9
	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP	Červená	610 - 760	1,63 - 2,03
	GaAsP, AlGaInP, GaP	Oranžová	590 - 610	2,03 - 2,10
	GaAsP, AlGaInP, GaP	Žlutá	570 - 590	2,10 - 2,18
	InGaN/GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP	Zelená	500 - 570	1,9 - 4
	ZnSe, InGaN, SiC, Si	Modrá	450 - 500	2,48 - 3,7
	InGaN + luminofor	Fialová	400 - 450	2,76 - 4
	AlN, AlGaIn, AlGaInN	Ultrafialová	< 400	3,1 - 4,4
	SiC/GaN + luminofor	Bílá	Celé viditelné spektrum	3,5

PN přechody můžeme rozdělovat na dva typy, homogenní a heterogenní. Homogenní přechod je z historického hlediska starším typem přechodu. Vznikne, pokud vytvoříme přechod uvnitř

stejnorodého materiálu. PN přechod se v takovém materiálu vytváří dotací příměsemi. Takto vytvořené diody jsou levné a jednoduché na výrobu. Potýkají se ovšem s velkým podílem nezářivých rekombinací, které snižují výkon diody a způsobují ohřívání přechodu.

Proto byly vynalezeny heterogenní přechody. Ty jsou tvořeny dvěma druhy materiálu a vykazují podstatně lepší vlastnosti, alespoň co se výkonu týče. Jinak jsou diody s heterogenními přechody dražší a složitější na výrobu [9].



Obrázek 6.2: Vlevo nízko výkonová LED, vpravo vysoko výkonová LED [10][11]

U klasické nízko výkonové diody je LED čip spojen se dnem důlku s vysoce odrazivým povrchem. Toto místo propojení tvoří katodový kontakt, zatímco anodový je připojen k vrchní části čipu. Obal těchto diod mívá obvykle tvar polokoule a je vyroben z epoxitových materiálů.

Výkonové diody bývají obvykle připojeny na desce plošných spojů, kde jsou vyvedeny kontakty pro připojení k napájení a dále se zde nachází jeden nebo více kontaktů pro odvádění tepla [9].

6.2 LED diody emitující bílé světlo

Ve své podstatě existují dvě metody, jak lze vytvořit bílé světlo. Protože není možné vytvořit LED, u které by bílé světlo vznikalo rovnou z přechodu. Existuje stará RGB metoda, která skládá bílé světlo ze tří (červené, zelené a modré) diod, jedná se však o neefektivní a nestálý způsob. Mnohem sofistikovanější je luminoforová metoda.

Luminofor je látka schopná pohlcovat energii a následně ji vyzařovat ve formě světla. Jedná se o jev zvaný luminiscence, což je spontánní (samovolné) záření (obvykle) pevných nebo kapalných látek, které vzniká jako přebytek záření tělesa nad úroveň jeho tepelného záření v dané spektrální oblasti při dané teplotě. Toto záření má určitou dobu doznívání, tedy trvá i po skončení budícího účinku. Lze také říci, že luminiscence je děj, při němž záření o kratší vlnové délce (větší frekvenci) vyvolává v látce určitého složení vznik záření o delší vlnové délce (nižší frekvenci). Luminiscence vzniká excitací atomu působením jiného záření, elektronů apod., a následným návratem elektronů do základního stavu, čímž dojde k vyzaření fotonu [12].

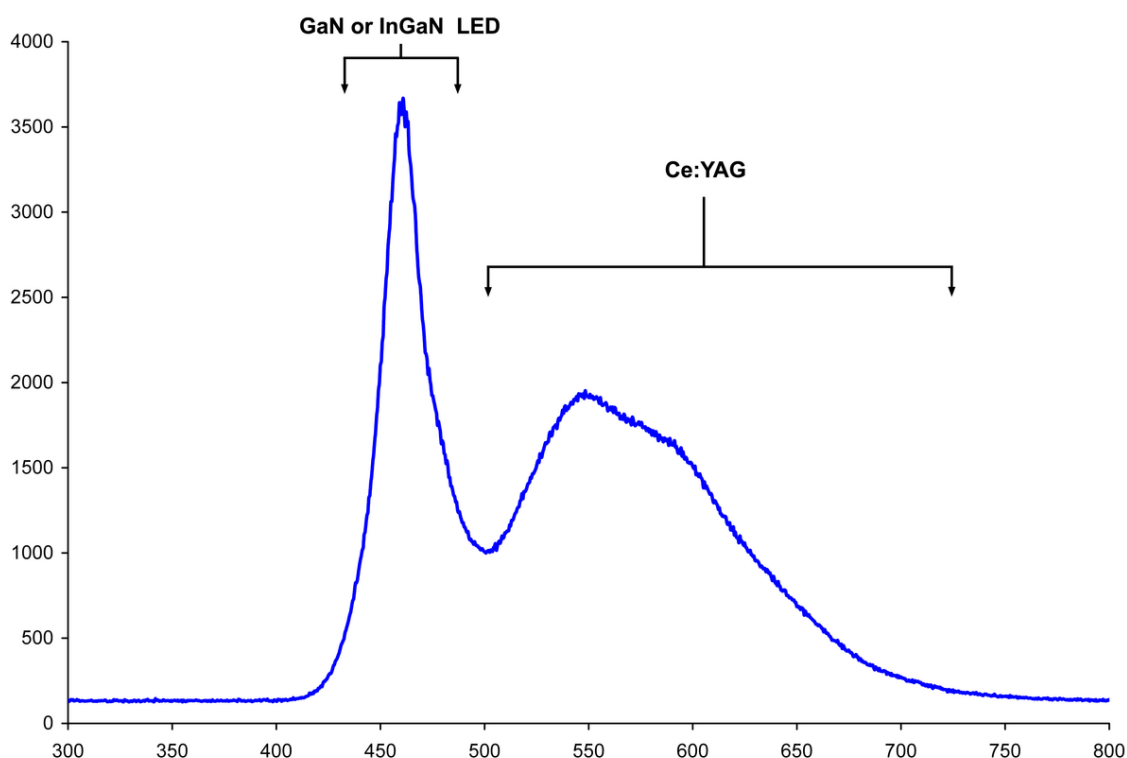
6.2.1 Výkonové LED diody v automobilovém průmyslu

Výkonové LED diody emitující bílé světlo jsou zkonstruovány tak, že v základu generují světlo modré barvy, tedy jsou z materiálu GaN nebo InGaN, ovšem na povrchu těchto diod je nanášena vrstva žlutého luminoforu jako na obrázku 6.3. Ten ve skutečnosti emituje barvy složeného červeného a zeleného spektra ale to se jeví jako žluté, proto je dále pro zjednodušení zmiňováno žluté světlo.



Obrázek 6.3: Bílá výkonová LED od společnosti Nichia NCSW 170CT [13]

Převážně bývá používán luminofor Ce:YAG tedy Yttrium Aluminium Garnet dopovaný Cérem. Tento luminofor částečně absorbuje fotony na vlnových délkách modrého světla a následně je emituje všesměrově ve formě světla žluté barvy, jak lze vidět v grafu 6.4. Jelikož lidské oko takzvaně integruje, což znamená, že celková barevná informace bodu, kterou oko vnímá, je vztažena k okolí bodu, vnímáme toto složení modré a žluté barvy jako bílé.



Obrázek 6.4: Spektrum bílé výkonové LED složené z modré a žluté složky světla [14]

Podle velikosti jedné či druhé složky pak vnímáme barvu s menší či větší teplotou chromatičnosti. Větší podíl modré složky zvyšuje teplotu chromatičnosti, tím pádem se světlo stává studenější, a větší podíl žluté snižuje teplotu chromatičnosti, což vizuálně budí dojem teplejšího bílého světla.

7 Polydimethylsiloxan (PDMS)

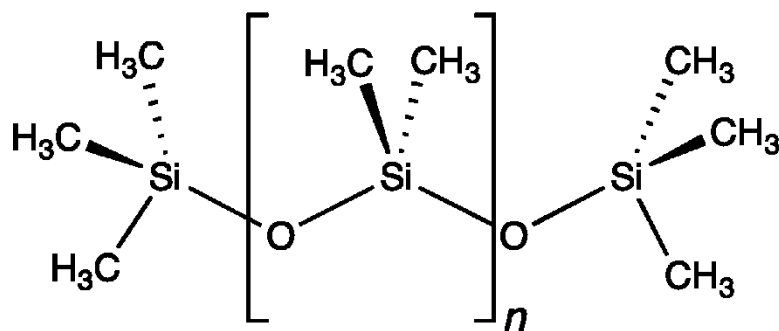
Polydimethylsiloxan patří do skupiny polymerních organokřemičitých sloučenin, které se běžně označují jako silikony. PDMS je nejpoužívanější organický polymer založený na bázi křemíku a je zvláště známý pro své neobvyklé reologické (neboli průtokové) vlastnosti. PDMS je netoxický, nehořlavý a obecně inertní, což znamená, že nevytváří mnoho (či žádné) chemické sloučeniny. Je také nazýván Dimethicon a je jedním z několika typů silikonového oleje (polymerizovaného siloxanu). Jeho aplikace sahají od kontaktních čoček a zdravotnických prostředků přes potravinový průmysl (prostředek pro pění) až po těsnění, maziva a žáruvzdorné dlaždice [16].

PDMS je látka s vynikající teplotní odolností, biokompatibilitou, flexibilitou a extrémně nízkou hodnotu skelného přechodu. Proto může být sloučen různými způsoby, nicméně jeho mechanické vlastnosti (modul pružnosti) jsou nízké, a to i po sloučení. Je proto zapotřebí inovačních technologií, aby se zlepšily mechanické vlastnosti; přidáním částicového plnidla, což je široce používaný přístup k posílení polymerní matrice. Koeficient tření (COF) je další vlastnost, které vyžaduje zlepšení pro PDMS. Neboť zlepšení COF vede ke zlepšení v opotřebení a vlastnostech buněčné adheze. PDMS má modifikovaný povrch pro vytvoření struktury s nízkým třením pro biomedicínské aplikace [16].

7.1 Chemické složení

Z hlediska chemického složení patří PDMS mezi opticky čisté materiály, které obsahují jen malou míru nečistot a nejsou tak vhodným prostředím pro bakterie. PDMS je čirá kapalina, bez zápachu a chuti, která je díky své vysoké viskozitě téměř nerozpustná ve vodě. Je odolná vůči vysokým teplotám. Běžné teploty použitelnosti se pohybují v rozmezí $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při krátkodobém teplotním namáhání odolají teplotě až $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je také odolný vůči chemikáliím, radiaci a UV záření. Hlavní nevýhodou je nákladná a složitá výroba [17].

Pro výrobu PDMS se používá technický křemík a kombinace kyseliny chlorovodíkové a metanolu, která vytváří chlormetan. Výroba postupně prochází čtyřmi chemickými reakcemi (syntézou, rektifikací, hydrolyzou, polykondenzací) [17]. Chemické složení PDMS lze vidět na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Chemický vzorec PDMS [18]

Ze schématu lze vidět, že jednotlivé methylové skupiny jsou vázány pomocí křemíku, který je čtyř vazbový k sobě. Takto svázané molekuly jsou nazývány dimethylem. Následným spojováním skrze molekuly kyslíku vzniká siloxan a jejich polymerací Polydimethylsiloxan.

7.2 Elastomer Sylgard

Pojmem Sylgard se označuje dvousložkový zalévací a zapouzdřovací elastomer na bázi PDMS doplněný o vytvrzovací činidlo. Teprve po přidání vytvrzovacího činidla lze PDMS vytvrdit. Různé varianty silikonových gelů mají různé vlastnosti, a proto se liší i svým použitím.

7.2.1 Sylgard 170

Sylgard 170 se především vyznačuje vynikající samozhášecí schopností a po vytvrzení je velice pružný, snadno opravitelný a vysoce odolný. Sylgard 170 je certifikován dle normy EN 50028 (zapouzdření typu „m“ – nebezpečí výbuchu). Teplotní rozsah se pohybuje od -60 °C až po +200 °C. Jednotlivé složky jsou barevně rozlišeny, proto se poměr mísení 1:1 dá kontrolovat i vizuálně. Udávané teploty pro vytvrzení jsou 70 °C (15 minut), 100 °C (8 minut) a při teplotě 150 °C pouze 3 minuty [17].

Tento elastomer je využíván pro zalévání transformátorů, zvedacích magnetů a elektronických jednotek v automobilovém průmyslu. Také se používá pro zapouzdřování elektrických zdrojů, relé a feritových jader. [17]

7.2.2 Sylgard 517

Jedná se o nízkoviskózní dielektrický samozacelující gel, který má trvalou adhezi k většině materiálů. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty, při zvýšené teplotě dochází ke zrychlení tohoto procesu. Doporučené teploty pro vytvrzení jsou 60 °C (4 hodiny), 100 °C (1 hodina) a 150 °C (15 minut). Obě složky produktu se míchají v poměru 1:1 [17].

Je speciálně navržen pro aplikace, kde se vyžaduje dlouhotrvající těsnící efekt proti vlhkosti, např. v optoelektronice pro zalévání optických kabelů a spojek. Dále slouží jako ochrana pro elektronické obvody. [17]

7.2.3 Sylgard 182 a 184

Sylgard 184 je použit v praktické části pro výrobu optických světlovodů.

Jedná se o dvousložkovou kapalinu, ředěnou v poměru 10:1. Jakmile se sloučenina důkladně promíchá, vznikne flexibilní elastomer vhodný k povrchové ochraně zařízení, jako jsou například sluneční kolektory a jiná zařízení, kdy je důležité, aby jejich povrchová úprava dokonale propouštěla sluneční svit bez znehodnocení UV zářením. Není nutná jiná příprava pokrývaného povrchu, než jeho očištění. Pokud je to možné, nalévání a dávkování silikonu a činidla by mělo být prováděno za sníženého tlaku a to zejména v případě, že tekutina obsahuje mnoho vzduchových bublinek. Pokud tato technika nemůže být použita, částice by měly být odstraněny poté, co bylo nalito silikonové činidlo.

Sylgard 184 je vytvrzován na vzduchu i za běžné pokojové teploty 25 °C, kdežto Sylgard 182 je vytvrzován teplem. Tento jinak velmi zdoluhavý proces lze urychlit zvýšením teploty prostředí a to až na teplotu převyšující 150 °C. Není vyžadován, žádný dovytvrzovací proces. Proces tvrdnutí začíná již při míchání silikonu a reakčního činidla (též lze použít tužidlo elastomeru). Zpočátku je tvrdnutí reprezentováno postupně se zvyšující viskozitou, následovanou gelováním a finální konverzí na pevný elastomer [16].

7.3 Typické a mechanické vlastnosti PDMS

Tabulka 7.1: *Typické a mechanické vlastnosti elastomerů Sylgard 182 a Sylgard 184*

Typická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Viskozita základní složky [mPas]	5475	5100
Viskozita po přidání vytvrzovacího činidla [mPas]	4575	3500
Doba použitelnosti 25 °C [hod]	8	2
Po vytvrzení		
Odolnost vůči teplotnímu šoku (-55 °C – 155 °C)	10 cyklů	10 cyklů
Tepelná vodivost [W/m.K]	0,16	0,16
Mechanická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Tvrdost (shore)	A51	A48
Mez pevnosti v tahu [MPa]	6,2	6,2
Pevnost v roztržení [kN/m]	2,7	2,7
Bod lámavosti [°C]	< -70	< -70

Tvrdost Shore se měří přitlačným tvrdoměrem, který se nazývá durometr. Stupnice tvrdosti Shore A se používá pro určení tvrdosti měkkých gum, polyesterů, PVC, kůží, nitrilových gum apod. Číslo vyjadřuje tvrdost materiálu (0-100), kdy 0 reprezentuje měkké materiály a 100 materiály tvrdé. Sylgard se nachází na této stupnici zhruba uprostřed a jeho tvrdost se dá např. přirovnat k tvrdosti těsnicí gumy u dveří [17].

7.4 Optické vlastnosti PDMS

Při práci s transparentními materiály v optice je nezbytné být si vědom elementárních optických vlastností, jako je index lomu, propustnosti a absorpce. Níže uvedená tabulka 7.3 odhaluje indexy lomu vybraných transparentních materiálů a porovnává je s polydimethylsiloxanem.

Tabulka 7.2: *Srovnání indexů lomu různých transparentních materiálů*

Vlnová délka [nm]	Index lomu PDMS	Index lomu PMMA	Index lomu SiO ₂ (křemenné sklo)
589	1,411	1,490	1,458
632	1,422	1,488	1,457

Optická propustnost PDMS nedosahuje hodnot propustnosti SiO₂ jež činí 99,99%, ale převyšuje propustnost PMMA (92%) o 4%. Absorpce polydimethylsiloxanu se pohybuje okolo hodnoty 0,04% [17].

8 Postup výroby světlovodů

Jak již bylo zmíněno, tato práce je zaměřená na výrobu válcových světlovodů z materiálu Polydimethylsiloxan. Pro výrobu těchto světlovodů jsem zvolil Silicone Elastomer Sylgard 184 od společnosti Dow Corning. Samotný silikon je velmi viskózní, svými vlastnostmi, skupenstvím a bezbarvostí spíše připomíná bezbarvé mazivo či bezbarvý med. V tomto skupenství není možné vytvářet pevné struktury jako např. válcové světlovody. V tomto stavu jsou jeho optické vlastnosti velmi nevyhovující. Je nutno nechat tuto látku projít procesem tvrdnutí. Až po skončení procesu vytvrzování je polydimethylsiloxan schopen vést světlo uspokojivě. Platí zde pravidlo, že čím více se podaří PDMS vytvrdit, tím se v něm bude lépe šířit světlo s tím menšími ztrátami v průběhu přenosu. Pro vytvrzování jsem použil tvrdnoucí činidlo od stejné společnosti. Oba produkty lze vidět na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Vlevo samotný silikon, vpravo vytvrzovací činidlo

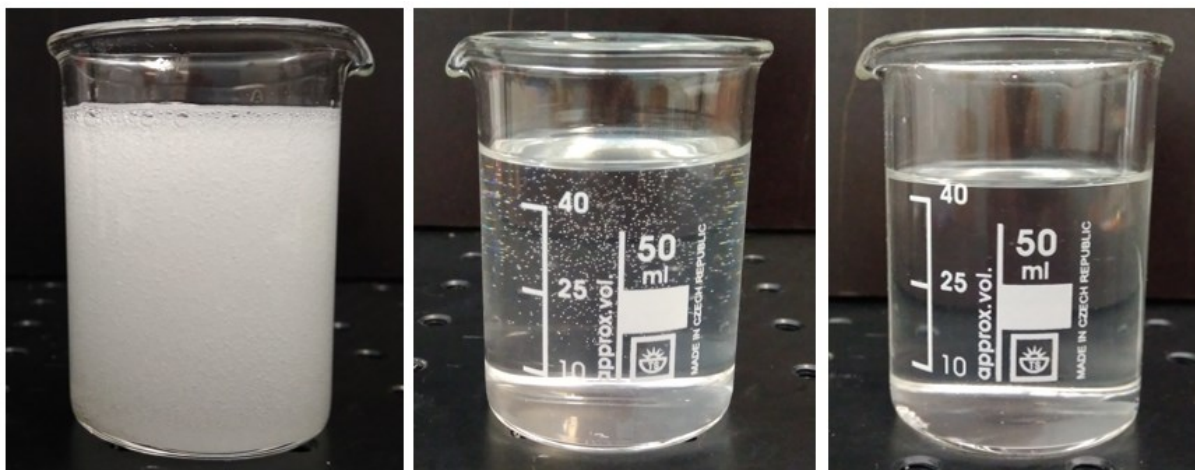
Firma Dow Corning udává, že pro optimální vytvrzovací účinky je dle datasheetu výrobku stanoven poměr míchání 10:1 a to tak, že na 10 dílků Elastomeru je třeba přidat 1 dílek tvrdnoucího činidla. Tento poměr je možno měnit s ohledem na výsledný průběh tvrzení. V případě, že budeme poměr zvyšovat, samotný proces tvrdnutí bude probíhat déle a naopak. Výrobce však udává, že pro optimální optické vlastnosti je třeba dodržet poměr 10:1. Konkrétní časové hodnoty tvrdnutí však úzce souvisí z prostředím, kde se takto namíchaná směs vyskytuje. Velmi významnými parametry, které tuto dobu tvrdnutí ovlivňují, jsou například okolní teplota, okolní vlhkost či množství dopadajícího UV záření na tvrdnoucí směs.

8.1 Příprava směsi

Nejprve jsem namíchal směs jednotlivých složek PDMS a vytvrzovacího činidla. Jedna složka z jedné nádoby nesmí přijít do styku s druhou, jelikož by poté došlo ke znehodnocení celého setu. Z tohoto důvodu jsem vždy používal pro nabírání silikonu jinou laboratorní pomůcku než pro nabírání vytvrzovacího činidla. Pro PDMS jsem vždy použil novou injekční stříkačku a pro činidlo vždy novou plastovou pipetu.

Poté jsem si připravil novou čistou kádinku pro vytvoření směsi, dále jsem pomocí injekční stříkačky z plechové nádoby nabral potřebné množství PDMS. Jelikož konzistencí opravdu připomíná med, je manipulace s ním poměrně obtížná. Přesné množství v kádince jsem měl příležitost sledovat pomocí profesionální laboratorní váhy KERN PCB, která váží s přesností na 3 desetinná místa. Ve chvíli kdy jsem měl potřebné množství PDMS v kádince, přišla řada na tvrdnoucí činidlo. To jsem nabíral pomocí laboratorní pipety v potřebném množství odpovídající poměru 10:1. Jelikož toto reakční činidlo při přidání do kádinky s PDMS zůstávalo na hladině, bylo nutné, abych celou směs velmi důkladně promíchal. Čím lépe se podaří obě složky mezi sebou promísit, tím bude směs uvnitř homogennější a tím kýžené optické vlastnosti příznivější.

Jelikož jsem neměl k dispozici profesionální laboratorní míchačku, mísil jsem mezi sebou směs ručně pomocí plastové pipety. Toto mísení vždy probíhalo ve formě pěti minutového intenzivního promíchávání obou složek v kádince. Vlivem tohoto mísení, se do celé směsi dostalo spoustu okolního vzduchu ve formě větších či menších bublinek. Tento stav je nevyhovující pro výrobu světlovodů jelikož na těchto bublinkách by docházelo k nežádoucím odrazům a lomům světla, což by mělo za následek velké ztráty optického výkonu. Bylo třeba nechat všechny bublinky uniknout. Z tohoto důvodu jsem vždy celou směs umístil do lednice s teplotou 11 °C, kde se díky chladu urychlil proces odvdzušnění těchto vzniklých bublin, což je způsobeno zvyšující se rozpustností plynů v kapalinách s klesající teplotou. Navíc se snižující se teplotou se zpomaluje proces tvrdnutí, který započal již samotným mísením PDMS s tvrdidlem. Vpravo na následujícím obrázku 8.2 lze vidět, jak vypadá směs přímo po promíchání, vprostřed po 2 hodinách v lednici a vlevo po 4 hodinách v lednici.



Obrázek 8.2: Proces vyprchání bublinek v lednici

Směs po promíchání a vychlazení mírně sníží svou viskozitu z toho důvodu, že tvrdidlo má konzistenci kapaliny podobné vodě. Teprve takto připravená směs je již vhodná pro tvorbu optických světlovodů.

8.2 Příprava forem

Když jsem již znal postup výroby kvalitní směsi pro vylévání světlovodů, stál jsem před otázkou, jaký bude nejvhodnější postup při výrobě světlovodů. Polydimethylsiloxan je látkou velmi protékavou, která se dostane i skrz malá nezatěsněná místa a taktéž, když už jednou změníme jeho skupenství v pevné, pomocí vytvrzujícího činidla, inverzní proces již není možný. Výrobní proces musel být tedy nastaven tak, aby finální světlovod byl po vytvrzení hotový. To všem musí proběhnout v prostředí, které je zatěsněné takovým způsobem, aby zabránilo průtokům, protože jinak by v procesu tuhnutí mohlo dojít k vytečení směsi a znehodnocení výsledného vzorku. Z těchto důvodů jsem zvolil tvorbu vzorků pomocí plastových hadic jako na obrázku 8.3, pro všechny mé experimenty postačilo 10 metrů této hadice.



Obrázek 8.3: Vlevo zkrácená hadice – vpravo detail zakončení

Pro mou situaci zcela vyhovovala hadice, kterou si lze pořídit v jakémkoli větším obchodním řetězci se zaměřením na stavební a zahradní účely. Tato má konkrétně tyto parametry:

Tabulka 8.1: Popis parametrů použité plastové hadice

Délka hadice	10 m
Průměr vnitřní	6 mm
Průměr vnější	9 mm
Tvarově stála	Ano
Odolná proti lámání	Ne
Upozornění	Pro beztlaké použití
Hmotnost	0,43 kg
Provedení	PVC hadice
Materiál	Plast
Základní barva	Transparentní

Jelikož jsem předpokládal, že první kusy budou zatížené poměrně velkou mírou zmetkovitosti, než dospěju k optimálnímu řešení výroby, zprvu jsem zvolil délku světlovodů 10 cm. Délka hadice pak musela mít patřičnou rezervu, proto pro první kusy jsem ji krátil na velikost délky 13 cm.

8.3 Výroba prvních kusů

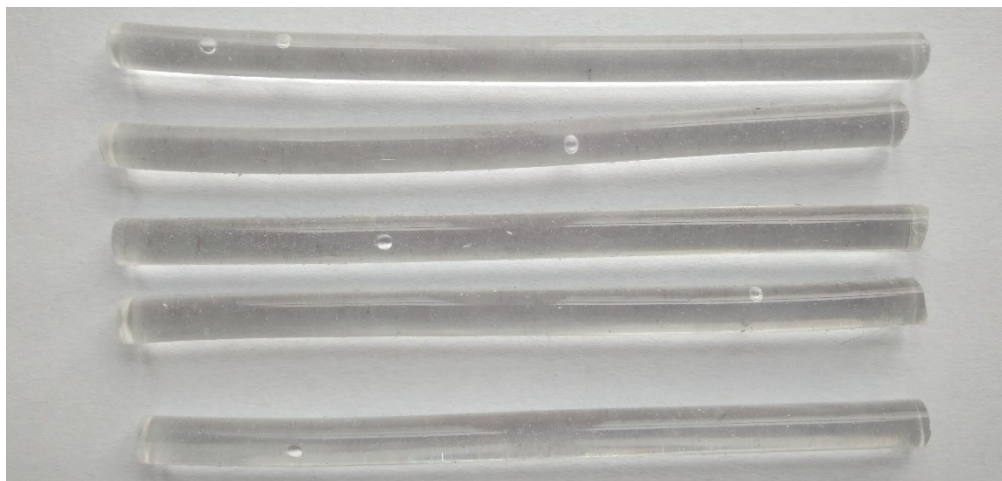
Nejprve jsem si namíchal směs PDMS podle kapitoly 8.1 a nechal z ní vyprchat bublinky v lednici po dobu 4 hodin. Během této doby jsem si zkrátil hadice na velikost 13 cm a připravil druhou směs PDMS, kterou budu používat jako těsnění pro čistou směs. Tuto promíchanou a lehce odbublinkovanou směs (v lednici hodinu) jsem poté nalil do plastových zkumavek do výšky 1 cm. Do takto připravené zkumavky jsem vložil zkrácenou 13 cm dlouhou hadici až na dno a ubezpečil se, že se celá vnořila do PDMS na dně zkumavky. Tento postup jsem opakoval i pro ostatní vzorky. Potom jsem všechny plastové zkumavky, s trubičkami dole vnořenými do PDMS, umístil do elektrické horkovzdušné trouby a na 80 °C a 20 minut jsem PDMS nechával zapéct, ať vytvoří ze spodní strany hadic přirozené těsnění. Poté jsem vzorky z trouby vytáhl a nechal je zchladit na pokojovou teplotu, což trvalo zhruba 10 minut. V tomto stavu již byly hadice se zkumavkami připraveny jako forma pro vylití prvních vzorků PDMS. Z lednice jsem odebral 4 hodiny odstátou směs bez bublinek a velmi pomalu a šetrně naléval do provizorních forem. Následně jsem takto naplněné vzorky upevnil na vertikální plochu pomocí izolepových pásek, jak lze vidět na obrázku 8.4, a počkal 24 hodin než se PDMS přirozenou cestou v pokojové teplotě samo vytvrdí.



Obrázek 8.4: *První tuhnoucí vzorek zafixovaný páskou*

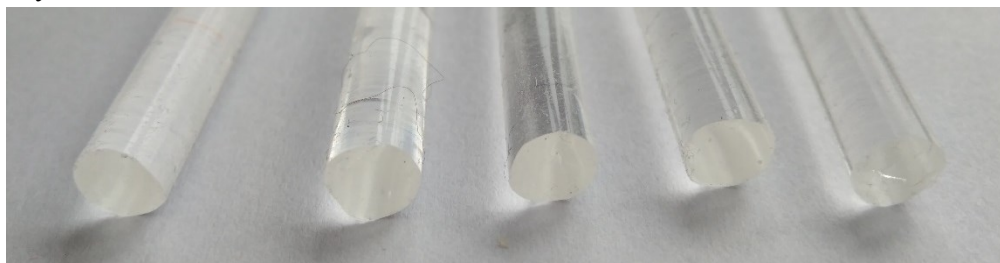
Po 24 hodinách jsem kusy vysunul z plastových zkumavek a prohlédl je skrze hadice. Již na první pohled šly vidět ve všech čtyřech kusech bublinky, které nestihly uniknout v průběhu 24 hodinového vytvrzování za pokojové teploty. Ty se dovnitř dostaly naléváním směsi směrem shora, jelikož i když nalévání shora probíhá pomalu, dost často se stává, že při stékání PDMS po okraji trubice vznikají rychlejší a pomalejší části směsi, které putují směrem dolů, přelévají se přes sebe, mísí

se se vzduchem a vytvářejí tak bublinky. Každou trubici jsem po straně nařízl keramickým nožem a světlovod vypreparoval. Těmito prvními řezy došlo k mírnému znehodnocení vzorků. Vzorky bylo třeba zkrátit na velikost 10 cm. K této akci jsem použil stejný nůž a v průběhu zkracování jsem si všiml dalších nedokonalostí. Vzorky byly vytvrzené, ale taktéž extrémně lepkavé a i po umytí vodou na sebe okamžitě přichytávaly všechny okolní nečistoty, jak lze vidět na obrázku 8.5.



Obrázek 8.5: *První vzorky s bublinkami*

Metoda zkracování vzorků keramickým nožem taktéž nebyla zvolena vhodně, jelikož PDMS v tomto stavu je extrémně poddajný a vždy, ať jsem zvolil jakoukoliv trajektorii řezu nebo tlaku na nůž, byly výsledky podobně neuspokojivé. Jak lze vidět na obrázku 8.6, řezy jsou každý jiný a mají pokroucený a lasturovitý tvar.



Obrázek 8.6: *Výsledky zkracování nevhodnou metodou*

Po zkontrolování tvaru světlovodů přišla další komplikace. Protože plastová hadice byla již při zakoupení ve zkrouceném stavu namotaná na váleci. Jejím narovnáním do přímé polohy a přilepením na vertikální skleněnou stěnu (obrázek 8.4) se z kruhového průřezu hadic stal eliptický, což se otisklo i ve finálním tvaru vzorků (obrázek 8.7).



Obrázek 8.7: *Eliptický průřez světlovodu*

Všechny tyto fatální nedokonalosti v postupu výroby bylo potřeba postupně odstranit.

Pro přehlednost jsou zde vypsány a seřazeny jednotlivé komplikace, které nastaly, a v následujících sekcích je ukázáno, jakým způsobem byly vyřešeny.

- **Deformovaný průřez výsledného světlovodu – eliptický tvar**
- **Nevhodná metoda nalévání – tvorba bublinek**
- **Nedostatečné vytvrzení světlovodu – lepkavost**
- **Nevhodný způsob zkracování světlovodu – nerovné řezy**

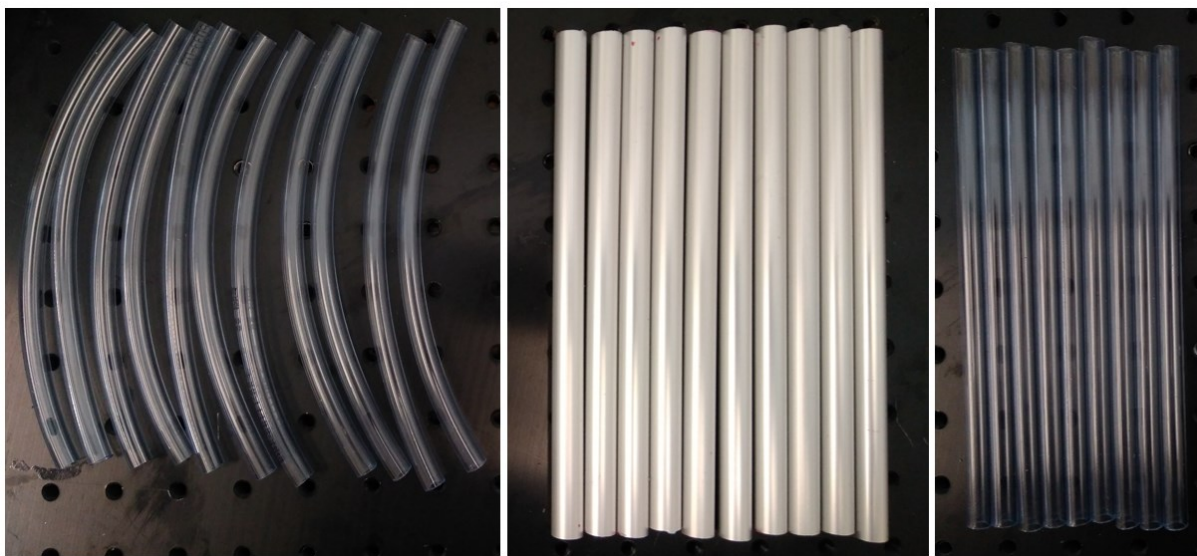
8.4 Výroba finálních kusů

Pro zkrácení a zjednodušení popisu celé výroby zde uvádím pouze konečná funkční řešení bez nefunkčních postupů a slepých cest, které jsem častokrát podstoupil. Čas, který byl věnován této práci, byl z velké většiny právě směřován pro vývoj s důrazem na co nejvyšší optické vlastnosti budoucích světlovodů.

8.4.1 Zajištění tvarové stálosti světlovodů

Jelikož z geometrických důvodů se ve světlovodech s kruhovým tvarem průřezu neoptimálněji šíří světlo, bylo nutné tento tvar zajistit. Plastové hadice jsem musel upravit tak, aby měly tento kruhový tvar po celém svém obvodu a zároveň, aby byly rovné bez známek ohybů. Pro tento účel jsem připravil hliníkové trubice s vnitřním průměrem 10 mm o délce 20 cm a vytvořil jsem takto 10 kusů. Předpoklad byl ten, že pokud trubice dostatečně zahřeju a budou vloženy do forem válcového tvaru, po následném vychlazení si již svůj nový tvar udrží. Protože teplota zesklnění (teplota, při které polymer přechází ze stavu kaučukovitého do stavu sklovitého) je u PVC zhruba 87 °C bylo nutné ho této teplotě vystavit.

Postup byl následující: Zkrátil jsem hadici na 18 cm dlouhé kusy, protože v této fázi jsem již počítal s 15 cm dlouhými světlovody, vložil je do předpřipravených 20 cm dlouhých hliníkových trubek, a ty vložil do dřevěného stojanu uvnitř elektrické trouby. Nastavil teplotu na 90 °C a 10 minut ponechal v této teplotě. Po následném vyjmutí z trouby, vychlazení a vyjmutí z hliníkových trubic byly PVC trubice naprosto rovné a podle předpokladů (obrázek 8.8).



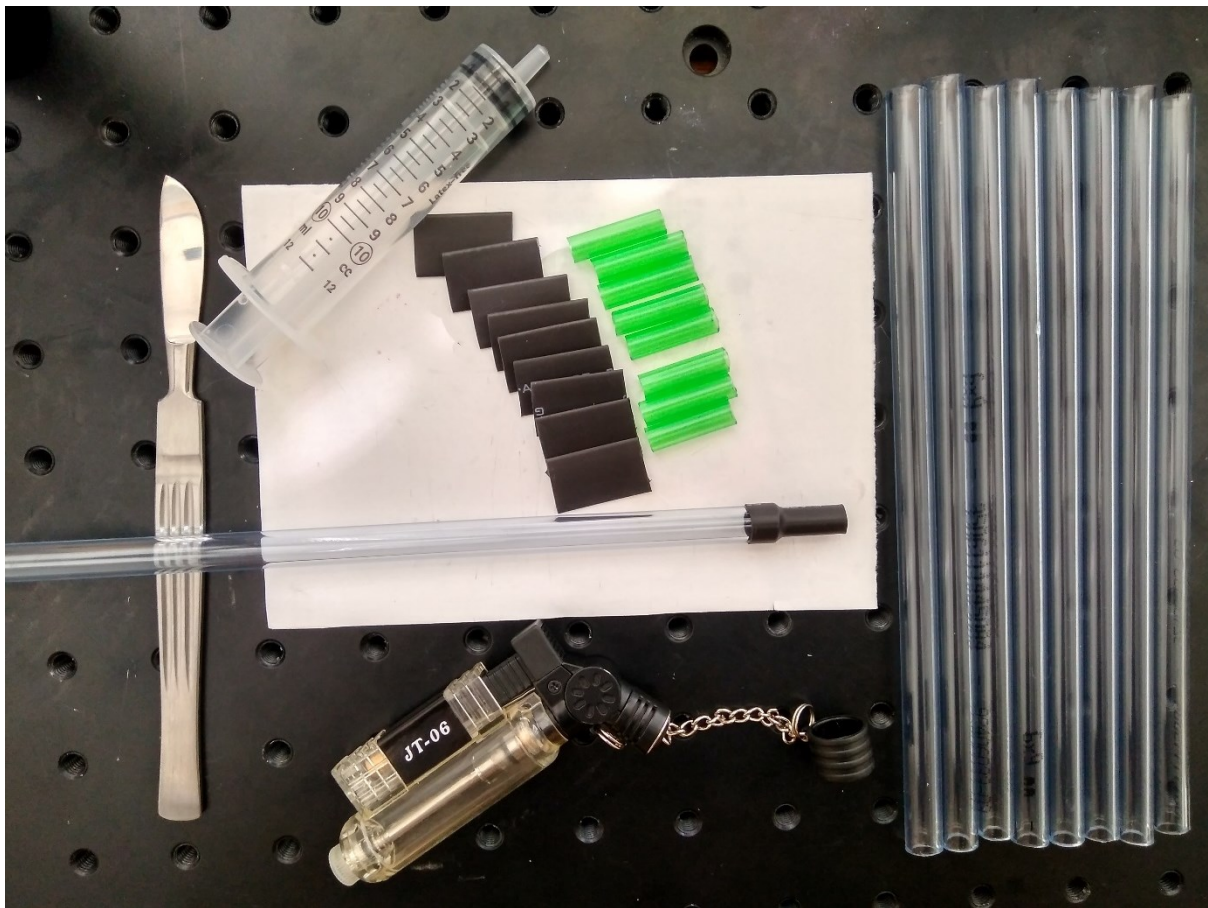
Obrázek 8.8: *Proces narovnání PVC trubic*

S takto narovnanými trubicemi mohla výroba světlovodů pokračovat k dalšímu postupnému kroku.

8.4.2 Optimální metoda naplňování

V průběhu výroby jednotlivých vzorků jsem se neustále potýkal se světlovody, co v drtivé většině obsahovaly více či méně vzduchových bublinek. Bylo nutné změnit metodu naplňování PVC trubic. Jelikož vzduchové bubliny vždy přirozeně unikají vzhůru, předpoklad byl takový, že pokud nechám nejprve uniknout bublinky a poté směsí napustím trubici, bublinek by mělo buďto razantně ubýt, či by měly úplně vymizet. S touto tezí jsem ale musel naplňovat trubice odspodu nahoru pomocí laboratorních injekčních stříkaček. Zároveň však tento spoj mezi stříkačkou a trubicí musel být dostatečně utěsněn, aby nedocházelo k průtokům PDMS v průběhu tuhnutí.

Postup byl následující: Nachystal jsem smršťovací bužírku, trubici se stejným vnějším průměrem jako vnitřní průměr narovnané trubice pro světlovody a injekční stříkačky, které svým hrdlem budou přesně a natěsno pasovat do menší výše uvedené trubice. Poté zkrátit trubici s menším průměrem na zhruba 2 cm dlouhé kusy, vsunout je do trubice pro světlovody, navléct bužírku a vše pomocí mini hořáku utěsnit. Potřebné části lze vidět na obrázku 8.9.



Obrázek 8.9: *Komponenty potřebné k výrobě světlovodů*

Takto připravené hadice jsem pomocí pásky připevnil na vertikální stěnu. Poté už jsem jen pomocí injekční stříkačky nabral z kádinky 5 ml promíchaného a z lednice odstátého PDMS. Bylo třeba dbát na to, aby se při naplňování stříkačky do ní nedostaly bublinky. Pokud se tak stalo, stříkačku vždy otočit hrdlem nahoru a bubliny nechat uniknout. Takto připravenou injekční stříkačku na doraz vsunout do předem připravených vertikálně upevněných hadic a vše zafixovat páskou. Zdá se, že důvodem proč P

přes hrdlo injekční stříkačky neprotekl, souvisí s jejím zdrsňeným povrchem a také skutečností, že hrdlo se směrem od vrcholu dolů mírně rozšiřuje. V následujícím obrázku 8.10 lze tuhnoucí světlovody vidět.



Obrázek 8.10: *Připevněné tuhnoucí vzorky*

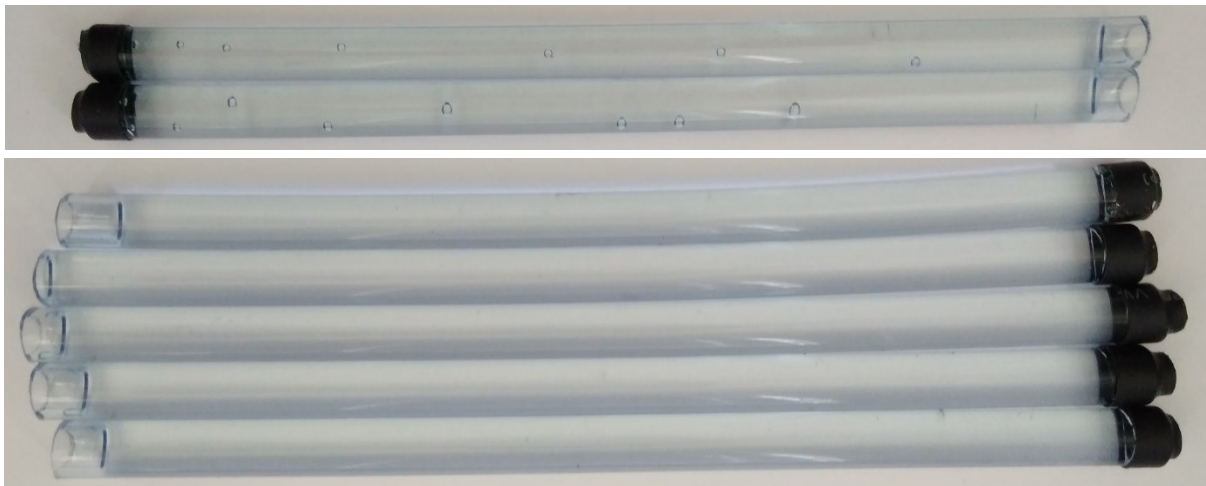
8.4.3 Princip dostatečného vytvrzení

Jak již bylo zmiňováno v teoretické části, PDMS dosahuje tím lepších optických vlastností, čím důkladněji a lépe je vytvrzen. Po několika neúspěšných pokusech bylo třeba zjistit, jakým způsobem budou reagovat světlovody na zrychlené vytvrzování pomocí zvýšené teploty okolí. Při samotném naplňování se však téměř vždy nějaké bublinky objevily, takže bylo nutné je nechat přirozenou cestou uniknout z roztoku a to si vyžadovalo čas. Z tohoto důvodu nebylo možné světlovody okamžitě po naplnění vystavit zvýšeným teplotám okolí, jelikož bychom znovu dostali vzorky se zmíněnými nehomogenitami uvnitř.

Postup byl následující: Po připravení a zafixování jednotlivých světlovodů, jak je znázorněno na obrázku 8.10, se po dobu 12 hodin nechaly vzorky vytvrzovat samovolně a byl jim ponechán čas pro únik bublinek. Po 12 hodinách konzistence směsi značně zhoustla a stala se napůl vytvrzenou. Takovéto vzorky byly odňaty ze stěny a zkráceny o injekční stříkačku v místě uprostřed bužírky. Tímto postupem bylo dosaženo zhruba 80% úspěšnosti v souvislosti s výskytem bublinek, ty ale zcela nevymizely. Tuto skutečnost připisuji nedostatečnému utěsnění v místě hrdla injekční stříkačky s vnitřním průměrem trubice. Pravděpodobně zde docházelo k vniku vzduchu dovnitř, což také potvrzoval fakt, že u těchto nepovedených světlovodů jsem vždy našel část PDMS, který unikl a potřísnil okolí, ale jednalo se pouze o minimální průsaky.

Zbytek však neprotekl, jenomže vzorky nebyly ještě zcela hotovy. Následně byly tyto vzorky vsunuty zpět do hliníkových tyčí, umístěny znovu do dřevěného stojanu do elektrické trouby a tam byly vystaveny teplotě 80 °C po dobu 45ti minut. Po této době bylo nutné vzorky ponechat postupně vychladnout a poté byly vzorky kompletně vytvrzené a připravené na zkrácení a vyjmutí.

V následujícím obrázku 8.11 lze vidět jednotlivé povedené a nepovedené kusy, touto metodou byla zvýšena úspěšnost povedených vzorků z 40% na zmíněných 80%.

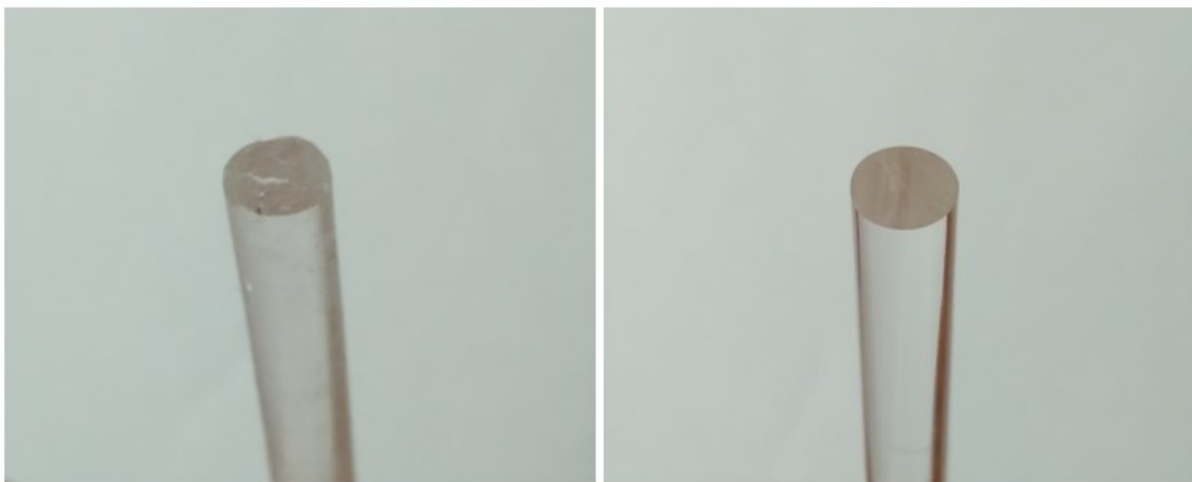


Obrázek 8.11: *Kusy po zapečení v 80 °C*

8.4.4 Konečná úprava vzorků

V poslední fázi jsem vypreparoval a vhodně zkrátil jednotlivé zhotovené vzorky. Zjistil jsem, že je nutno použít mnohem ostřejší čepel a provádět zkracovací řezy dokud je světlovod ještě v trubici. V tomto stavu je mnohem méně poddajný a mnohem přesněji se dají vést řezy. Navíc, při prvních zkušenostech jsem při bočním nařezávání PVC trubice občas pronikl zářezem až do samotného světlovodu a tímto jej znehodnotil, musel jsem najít jinou metodu. Předchozím způsobem docházelo k občasnému poničení kusů a zároveň celý proces preparování byl příliš zdlouhavý (zhruba 10 minut na kus).

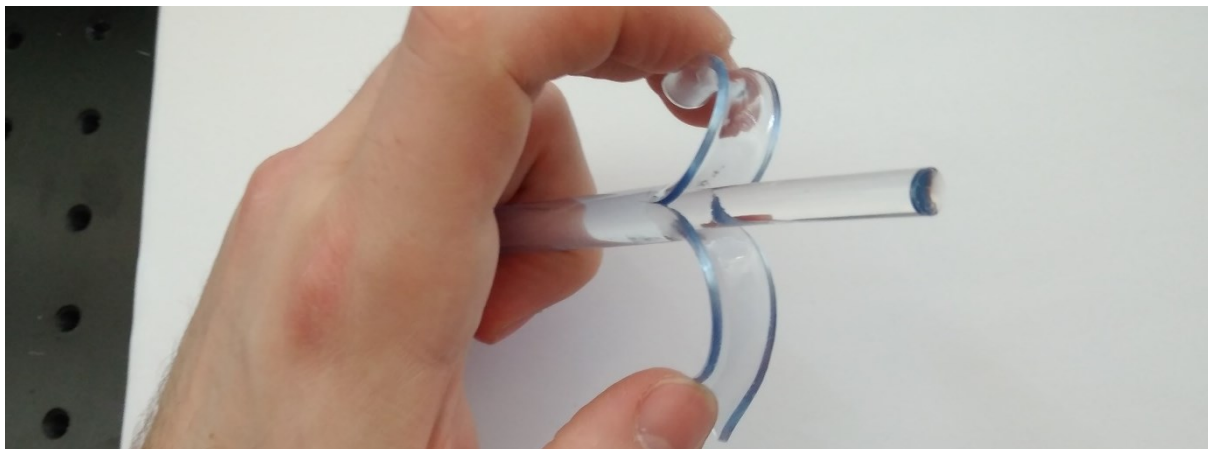
Postup byl následující: Místo obyčejného keramického nože jsem použil chirurgický ocelový skalpel, který je na obrázku 8.9, a díky jeho nesmírné ostrosti se daly řezy lépe kontrolovat, tímto způsobem jsem se naučil provádět rovné zkracovací řezy (obrázek 8.12).



Obrázek 8.12: *Vlevo vzorek z prvních kusů, řez nožem – vpravo kvalitní vzorek, řez skalpelem*

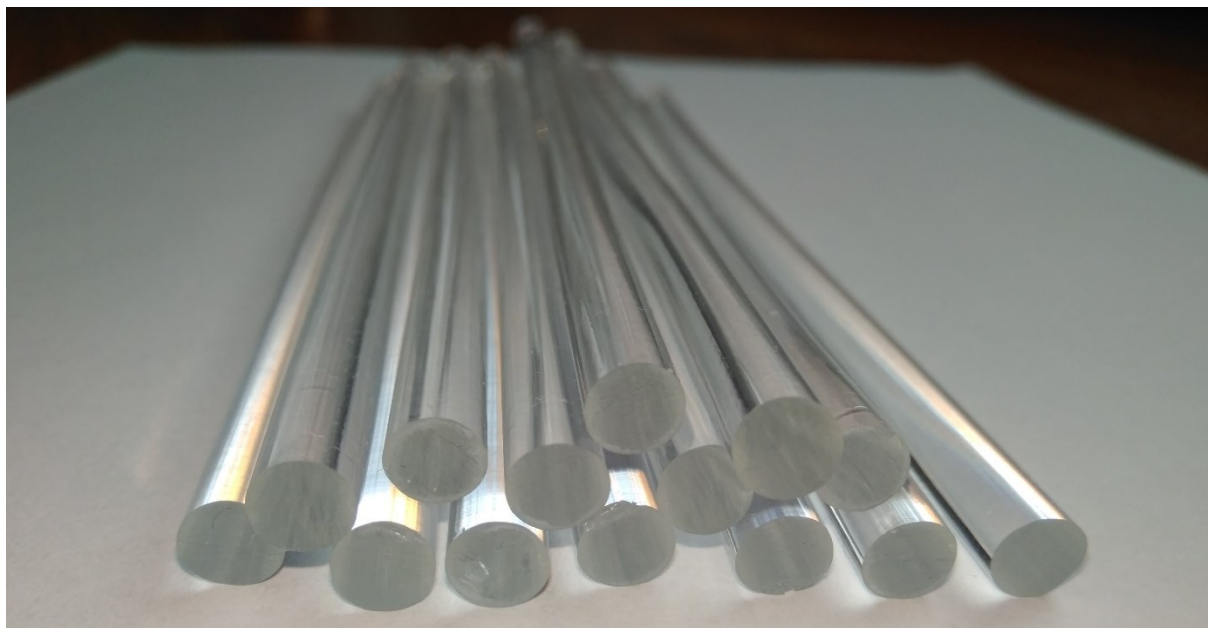
Bylo také mnohem snadnější korigovat jak hluboko proniknout do vrstvy trubice. Zároveň jsem změnil metodu na nařiznutí trubice ze dvou stran a pouze zhruba do poloviny tloušťky stěny. Následně

jsem pouhým tahem obou stran trubice od sebe rychle a jednoduše získal neporušený výsledný světlovod, jak je znázorněno na obrázku 8.13. Tento způsob zkrátil proces zhruba na 1 minutu.



Obrázek 8.13: *Preparování světlovodu z trubice*

Jak je možno vidět na obrázku 8.13 po vytvrzení vznikla na horní straně světlovodu vpouklá kulovitá plocha, z důvodů kapilárních jevů, která v pozdějších fázích při měření měla pozitivní efekt při navazování světla do světlovodu. Z tohoto důvodu jsem zkracoval vzorky pouze z druhé strany.

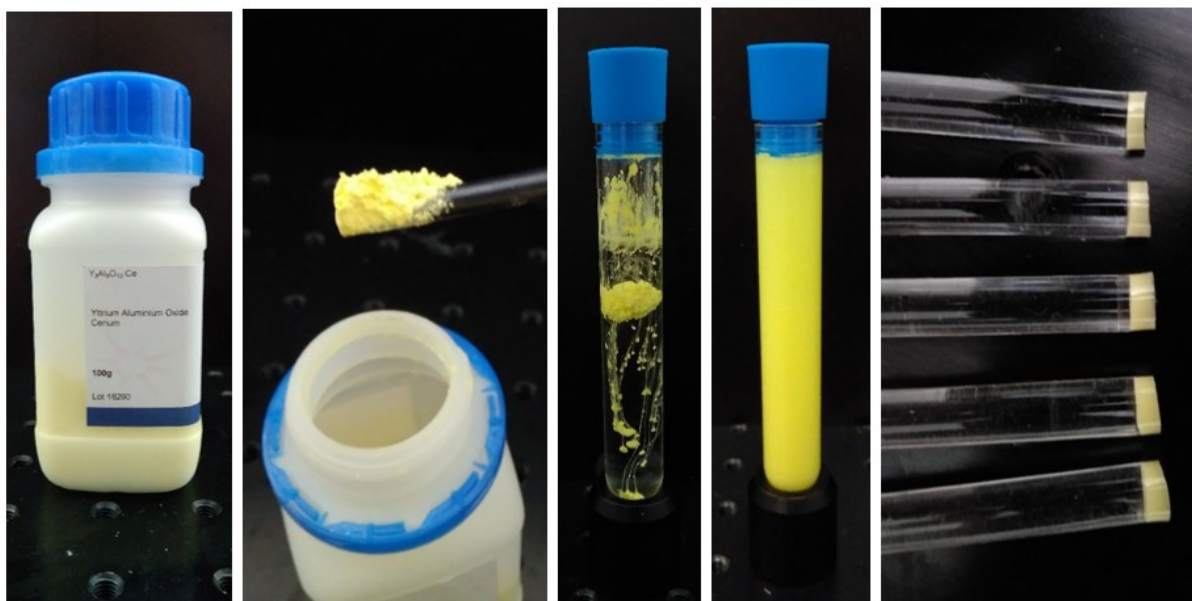


Obrázek 8.14: *Finální světlovody připravené k měření*

Na obrázku 8.14 výše lze vidět, konečný stav světlovodů. Celkem k měření bylo použito 20 vzorků. Jejich kvalitu lze posuzovat už i pouhým okem. Proces vytvrzování v 80 °C měl velmi příznivý efekt na celkový výsledek. Světlovody takto ošetřené nevykazovaly téměř žádnou lepkavost a jejich povrch je tak hladký, že se na nich láme světlo podobně jako by byly zhotoveny ze skla. První kusy a tyto se od sebe kvalitativně diametrálně odlišují, jelikož bylo dosaženo odstranění všech výše popsaných vad a nedokonalostí. V rámci laboratorních podmínek bylo dosaženo uspokojivé kvality vzorků.

8.5 Světlovody s vrstvou luminoforu

Nakonec jako poslední proces, spadající do kapitoly výroby světlovodů, byl zhotovit vzorky s vrstvou luminoforu na jejich konci. Část z 20ti vzorků jsem odebral a věnoval pro výrobu takto upravených světlovodů. Nejprve jsem potřeboval připravit směs PDMS a luminoforu. V našem případě šlo o žlutý luminofor s chemickým označením $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}_3$. Jedná se o yttrito-hlinitý granát dopovaný cérem, v praxi velmi často používaný luminofor. Podle předešlých zkušeností byl určen poměr luminoforu a PDMS 25:1. To znamená na 25 dílků PDMS 1 dílek luminoforu. K odměření této směsi jsem znovu použil velmi přesnou laboratorní váhu KERN PCB a k namíchání posloužila interně vyrobená laboratorní míchačka, speciálně určená pro míchání luminoforu s PDMS. Proces lze vidět na následujícím obrázku 8.15.



Obrázek 8.15: *Proces výroby světlovodů s luminoforem*

Postup byl následující: Protože se jedná o látku obsahující toxické kovy vzácných zemin, bylo třeba se opatřit gumovými rukavicemi a ústní rouškou pro minimalizování rizika požití či vdechnutí. Poté jsem do připravené směsi PDMS, v laboratorní kádince s uzávěrem, vložil v poměru 25:1 žlutý luminofor. Tuto směs jsem následně umístil do laboratorní míchačky, kde probíhal proces mísení 3 hodiny. Po třech hodinách byla směs PDMS a luminoforu téměř dokonale promísená, ale jelikož PDMS už postupně zvyšoval svou viskozitu, bylo třeba proces zastavit a pracovat se směsí takto promísenou. Následně jsem na již vyrobené světlovody navlékl půl cm dlouhé odkrojené PVC trubice a nechal nahoře prostor pro vylití směsi s luminoforem. Tento prostor jsem opatrně zaplnil směsí PDMS s luminoforem v různě vysokých vrstvách. Takto upravené světlovody jsem znovu vertikálně umístil do stojanů do elektrické trouby a na 10 minut zahřál na teplotu 80 °C. Poté jsem pouze odejmul PVC kusy trubiček a světlovody s různými vrstvami luminoforu na svém konci byly vyrobeny.

Zhruba polovina světlovodů měla buďto příliš silnou nebo naopak příliš slabou vrstvu a proto použitelných bylo na konci pouze 5 kusů, které vykazovaly uspokojivé výsledky při měření.

9 Vlastní měření

Tato kapitola je věnována měření vybraných optických parametrů světlovodů výše vyrobených o délce **15 cm**. Po dohodě s vedoucím práce a s ohledem na počet a různorodost měření, byla v této práci dána přednost získávání kvalitativních charakteristik měření nad kvantitativními. Zpracovávání nejistot měření není cílem této práce.

V měření jsou jako zdroje optického výkonu určeny výkonové LED čipy (RED, AMBER, WHITE), používané v automobilovém průmyslu pro reálné aplikace v signálních funkcích automobilových lamp. Tyto zdroje poskytla společnost Varroc Lighting Systems s.r.o. Taktéž je zde použita modrá výkonová LED pro měření konverze barvy světla.

Všechny tyto LED zdroje jsou vypsány v následující tabulce 9.1 spolu s jejich parametry.

Tabulka 9.1: *Parametry použitých LED*

Název	Proudový rozsah	Vlnová délka	Barva
KR DMLN 31.23	5 – 250 mA	621 nm	Red
KY DMLN 31.23	5 – 200 mA	590 nm	Amber
SX LD CN5M	30 – 250 mA	453 nm	Deep blue
NCSW 170CT	85 – 1200 mA	400 - 750 nm	Cold white

9.1 Použité přístroje

Ve všech čtyřech měřeních jsem použil jako napájecí zdroj profesionální zařízení společnosti Rohde & Schwarz s označením HM8143 a jako detektor, jsem používal profesionální spektrofotometr s integrační koulí od společnosti GL Optics s názvem GL Spectis 1.0, jež poskytla společnost Varroc Lighting Systems.

9.1.1 Rohde & Schwarz HM8143



Obrázek 9.1: *Fotografie použitého zdroje*

Tento zdroj napájení má proudový rozsah $I_f = 0 - 2$ A. Je u něj možno měnit hodnoty proudu po 10 mA a má možnost regulace maximálního protékajícího proudu na určenou hodnotu. Tuto možnost jsem neustále využíval, jelikož při propojení LED chipů se zdrojem se občas stala situace, kdy proud

zakolísal vlivem pohybů spojovacích drátů. Tento jev se stával v případech změně vzorků k měření nebo jiných podobných manipulací. Rozsah napětí je zde možno volit v rozmezí 0 – 30 V.

9.1.2 GL Spectis 1.0

Princip, na kterém funguje optický systém GL Spectis 1.0, závisí na používání miniaturní kolimační čočky s nanotiskem difrakčních čar a obrazový snímač CMOS, pracující v rozmezí vlnových délek 340 – 780 nm. Jedná se o miniaturní systém s nízkou ztrátou osvětlení, který dokáže poskytnout interval pro získávání dat roven 1,7 nm, což je ideální pro měření například LED a dalších světelných zdrojů ve vizuálním spektru.

Deska elektronických obvodů s mikroprocesorem zajišťuje správnou rychlost přenosu dat a velmi nízké hodnoty šumu. Snímač teploty namontovaný na desce sleduje změnu okolní teploty a její vliv na stabilitu měření.

K tomuto hardwaru taktéž patří software zvaný GL Spectrosoft, jehož součástí jsou ovladače SP-X obsahující všechny potřebné opravné postupy pro snížení ztrátového světla, chyby pásma, úrovně šumu a úrovně pozadí, aby bylo dosaženo nejlepší reprezentace spektra a nejvyšší přesnosti měření. Získané údaje jsou vypočteny podle norem CIE pro získání správného výpočtu barev pro LED a jiné světelné zdroje.

V následující tabulce 9.2 jsou znázorněny upřesňující parametry tohoto zařízení.

Tabulka 9.2: *Parametry GL Spectis 1.0*

Osvětlení	1 lx - 200 000 lx
Jas	1 cd/m ² – 10 000 cd/m ²
Interval fyzického rozlišení	~ 1.7 nm / ~ 1.8 nm
Spektrální rozmezí	340 – 780 nm
Index podání barev (CRI)	Ra, R1-R14
Odstup signálu od šumu	1 000:1
Radiometrická přesnost	4%
Integrační čas	5 ms – 100s
Barevná teplota (CCT)	ano
CIE koordináty barev (1931, 1960, 1976)	ano

Součástí tohoto spektrofotometru je taktéž integrační koule. Je to optická součást složená z kulové dutiny, jejíž vnitřní prostor je pokryt difúzní bílou reflexní vrstvou, s malým vstupním a výstupním otvorem. Jeho relevantní vlastností je rovnoměrný rozptyl, čili difúzní účinek. Světelné paprsky, které zasahují na jakémkoli místě vnitřního povrchu, jsou rozptýleny různými rozptyly rovnoměrně na všechny ostatní body. Prostřednictvím integrační koule, v kombinaci se spektrofotometrem, je možno jediným měřením detekovat veškerý výkon měřeného zdroje.

Na následujícím obrázku 9.2 je znázorněn výše zmíněný GL Spectis 1.0 s příslušenstvím.



Obrázek 9.2: Vlevo rozložený, vpravo složený GL Spectis 1.0

Číslem 1 je na obrázku označena integrační koule, číslem 2 spektrofotometr, číslem 3 napájecí/datový kabel a číslem 4 flash disk s HASP šifrovacím klíčem pro přístup do SW GL Spectrosoft.

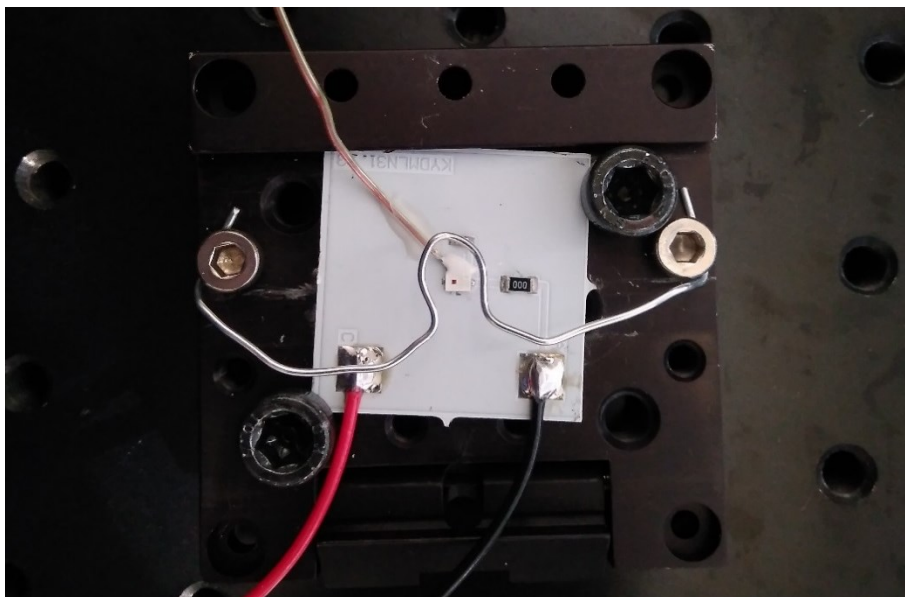
Nespornou výhodou tohoto zařízení je jeho kompaktnost a skladnost. Je taktéž na straně vybaven tlačítkem pro manuální spuštění sekvence měření, což celý proces měření velmi urychluje.

Toto zařízení, spolu s přidruženým softwarem, je schopno v průběhu jednoho měření změřit celou škálu optických parametrů zdroje jako je například: optický výkon, světelný tok, nejvyšší vlnovou délku, dominantní vlnovou délku, složení spektra, kolorimetrické souřadnice, index podání barev, teplotu chromatičnosti a další. Jedná se zkrátka o velmi silný nástroj pro analýzu složení barevného spektra.

9.2 Upevňovací konstrukce pro světlovody

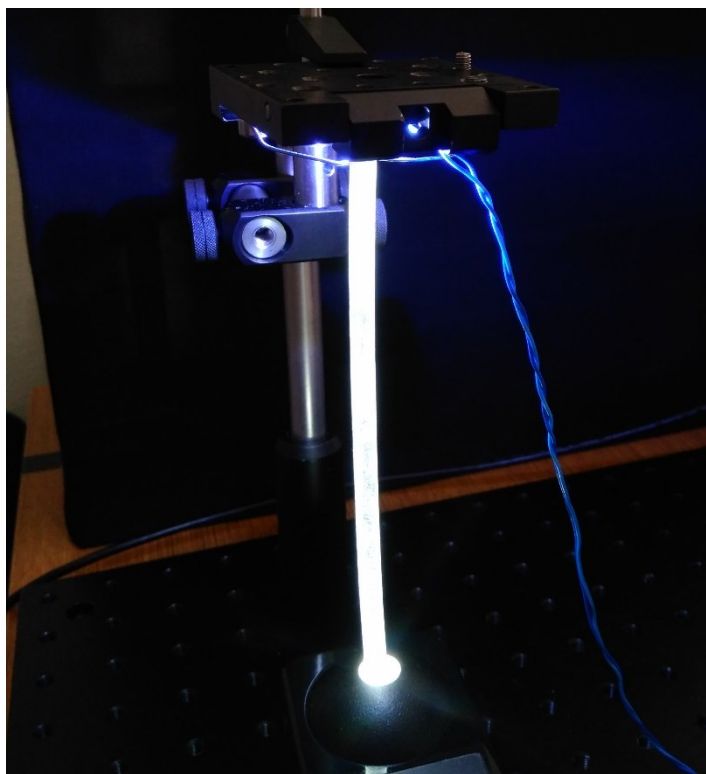
Jelikož bylo nutné v každém měření zajistit co největší míru opakovatelnosti, musel jsem přijít na způsob jak zařadit světlovody tak, aby byly přímo v bezprostřední blízkosti LED zdroje, ale zároveň aby podléhaly co nejmenším ztrátám výkonu z pohledu uchycovací fixační konstrukce. Z tohoto důvodu jsem fixační konstrukci koncipoval tak, že se skládala z nosného vertikálního stojanu, a nahoře byla připevněna malá plošina s velmi velkým počtem děr se závity různých průměrů. Tyto díry jsem potřeboval k upevnění dvou komponent. První komponentou bylo samotné PCB s LED zdrojem, které jsem fixoval vždy pevně na stejném místě. Druhou komponentou byla fixační konstrukce ve formě profilovaného drátu, který byl ohnutý tak, aby kopíroval tvar světlovodu ovšem s o půl milimetru menším průměrem ohybu. Tímto způsobem bylo zaručeno, že fixační konstrukce světlovodů ovlivňovala ztrátu výkonu na minimum, protože se dotýkala měřeného světlovodu pouze v jednom místě a světlovod, pomocí gravitační síly, přímo visel směrem dolů, kde vstupoval do ústí integrační

koule. Na obrázku 9.3 lze vidět vrchní část upevňovací plošiny. PCB s LED čipem je zde připevněno pomocí dvou tmavých šroubů a fixační komponenta z drátu je zde přichycena dvěma světlými šrouby. Vzdálenost drátu od PCB je zhruba 0,5 cm. Vše bylo zhotoveno ze stavebnice Thorlabs.



Obrázek 9.3: *Detail fixační konstrukce*

Na obrázku 9.4 níže už jde vidět kompletně celý koncept způsobu měření. Nachází se na něm celá konstrukce i s rozsvíceným světlovodem, který vstupuje do ústí integrační koule.



Obrázek 9.4: *Detail celé konstrukce s detektorem*

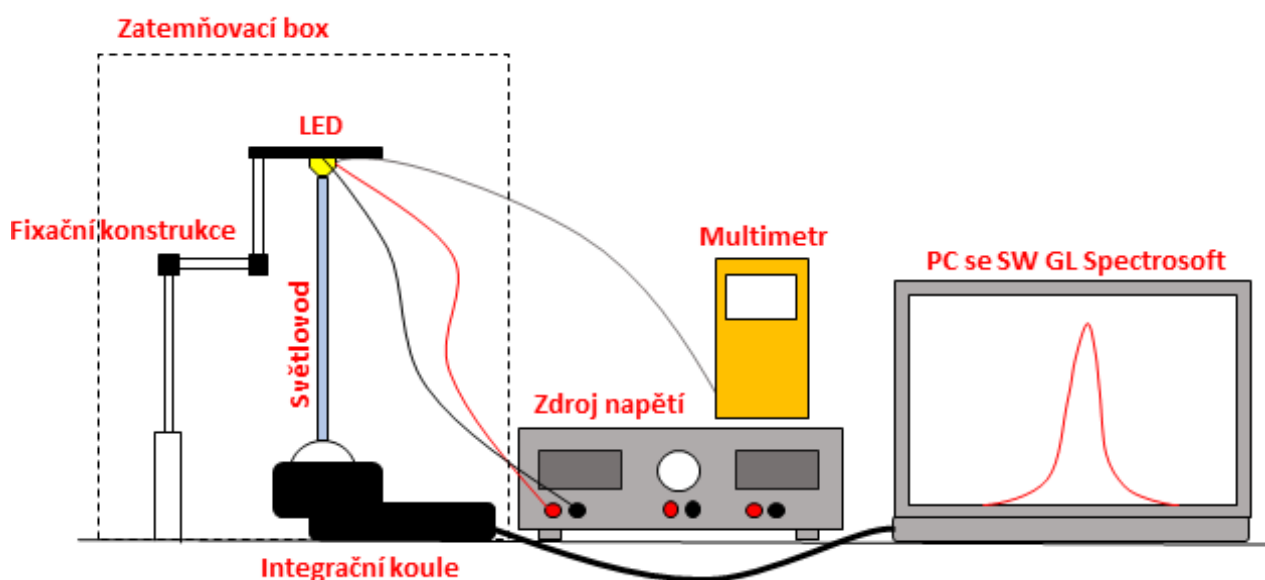
I když si každé měření vyžaduje své specifické podmínky, tento koncept je téměř vždy základem.

9.3 Měření útlumu a spektrálního posuvu

Prvním parametrem pro měření jsem zvolil celkový útlum optického výkonu a změnu rozložení spektra světla po průchodu světlovody z PDMS. Toto měření probíhalo se třemi LED čipy různých barev jako světelnými zdroji. Konkrétně šlo o červený, oranžový a bílý LED zdroj. Měrný útlum je počítán dle vzorců (3.3) a (3.4). Absorpční koeficient je počítán dle vzorce (3.6). Důležitým faktem je, že hodnoty rozptylu jsou při výpočtu absorpčního koeficientu zanedbávány.

9.3.1 Popis měřicího pracoviště

Pracoviště jsem sestavil tak, aby při každém měření byly zajištěny stejné podmínky měření. Mezi tyto podmínky patří stálá teplota prostředí, stálá teplota LED čipů, stálá hodnota procházejícího proudu a stálé světelné podmínky prostředí. Celá měřicí část byla zakryta zatemňovacím boxem proti ovlivňování výsledků měření parazitním světlem z okolí. Měření probíhalo na 5ti vzorcích z první série výroby a na 20ti vzorcích z poslední série. Schématický popis pracoviště lze vidět na obrázku 9.5.



Obrázek 9.5: Schéma měřicího pracoviště pro měření útlumu

Pro větší přehlednost zde umístíme také fotografie celého měřicího pracoviště na obrázku 9.6.



Obrázek 9.6: Fotografie měřicího pracoviště se zatemňovacím boxem

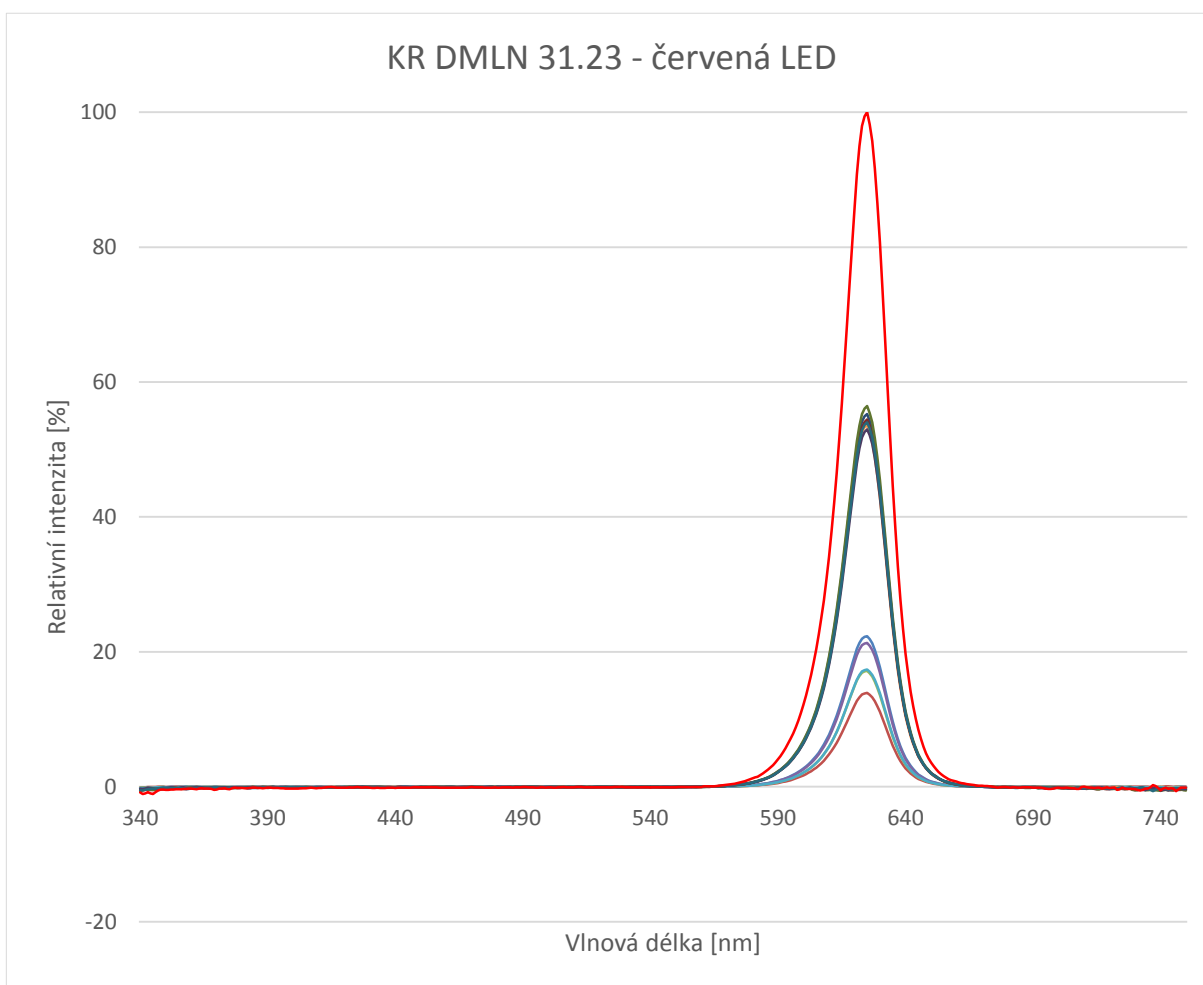
9.3.2 Výsledky měření - KR DMLN 31.23 – Červená LED

Tabulka číslo 9.3 zobrazuje naměřené hodnoty útlumů vyrobených světlovodů. Hodnota stálého pracovního proudu I_f pro červenou LED byla nastavena na **200 mA**. Nejprve byl měřen pouze samotný LED čip. Vstupní výkon odpovídal hodnotě **126,864 mW**, vstupní světelný tok pak odpovídal hodnotě **31,67 lm** a vlnová délka zdroje odpovídala hodnotě **625,01 nm**.

Tabulka 9.3: *Tabulka porovnávající hodnoty prvních a posledních kusů – červená LED*

Série	Číslo vzorku	Výstupní výkon [mW]	Výstupní světelný tok [lm]	Vlnová délka [nm]
1	1	27.82	6.96	625.01
	2	17.70	4.36	625.01
	3	21.39	5.36	625.01
	4	26.08	6.61	625.01
	5	21.66	5.41	625.01
Hodnoty průměru		22.93	5.74	625.01
Průměrný měrný útlum		0.4953	0.4945	[dB/cm]
Absorpční koeficient		0.11404		[m ⁻¹]
7	1	66.58	16.73	625.01
	2	68.24	17.18	625.01
	3	67.00	16.90	625.01
	4	69.73	17.55	625.01
	5	66.04	16.50	625.01
8	6	67.20	17.16	625.01
	7	64.47	16.68	625.01
	8	66.82	17.33	625.01
	9	63.96	16.52	625.01
	10	65.04	16.77	625.01
9	11	68.29	17.61	625.01
	12	65.42	16.71	625.01
	13	66.51	17.08	625.01
	14	67.02	17.21	625.01
	15	65.80	16.77	625.01
10	16	65.09	16.87	625.01
	17	60.43	15.52	625.01
	18	64.56	16.47	625.01
	19	63.98	16.36	625.01
	20	64.89	16.49	625.01
Hodnoty průměru		65.85	16.8205	625.01
Průměrný měrný útlum		0.1899	0.1832	[dB/cm]
Absorpční koeficient		0.04372		[m ⁻¹]

Z tabulky vyplývá, že nejen pouze vizuálně ale i podle naměřených výsledků lze říci, že kusy z první série, v porovnání s kusy z posledních sérií, se od sebe i útlumově diametrálně odlišují. Průměrné hodnoty měrného útlumu u prvních vzorků se pohybují okolo **0,4953 dB/cm** a průměrné hodnoty vzorků z poslední série se pohybují okolo **0,1899 dB/cm**. Jedná se bezmála o trojnásobné snížení útlumu vlivem zdokonalení výrobního procesu. Průměrné hodnoty absorpčního koeficientu jsou pak pro nekvalitní světlovody **0,11404 m⁻¹** a pro kvalitní vzorky **0.04372 m⁻¹**. Dalším hodnoceným parametrem v této kapitole je vliv průchodu světla materiálem PDMS na rozložení spektra. Po průchodu červeného světla o vlnové délce 625,01 nm se tato hodnota nikam neposunula. Zůstala naprosto stejná. V následujícím grafu 9.7, znázorňující rozložení spektra, lze vidět totožné výsledky.



Obrázek 9.7: Graf – porovnání světlovodů – červená LED

Spektrální křivka červené barvy dosahující hodnoty 100% relativní intenzity představuje naměřené spektrum samotného červeného LED čipu. K tomuto spektru jsou následně navázány křivky spekter hustě naskládaných na sebe s přibližně polovičním výkonem. Ty představují 20 kusů světlovodů z posledních sérií. Kusy s přibližně pětinovým výkonem představují první vzorky. Posun v kvalitě také pozorujeme v mnohem menší vzájemné rozdílnosti jednotlivých kusů z první a posledních sérií. Rozdíl lze vidět řádově v jednotkách % u kvalitních kusů a řádově v desítkách % u prvních kusů. Graf také potvrzuje, že po průchodu světla PDMS světlovodem nedochází k žádnému spektrálnímu posuvu.

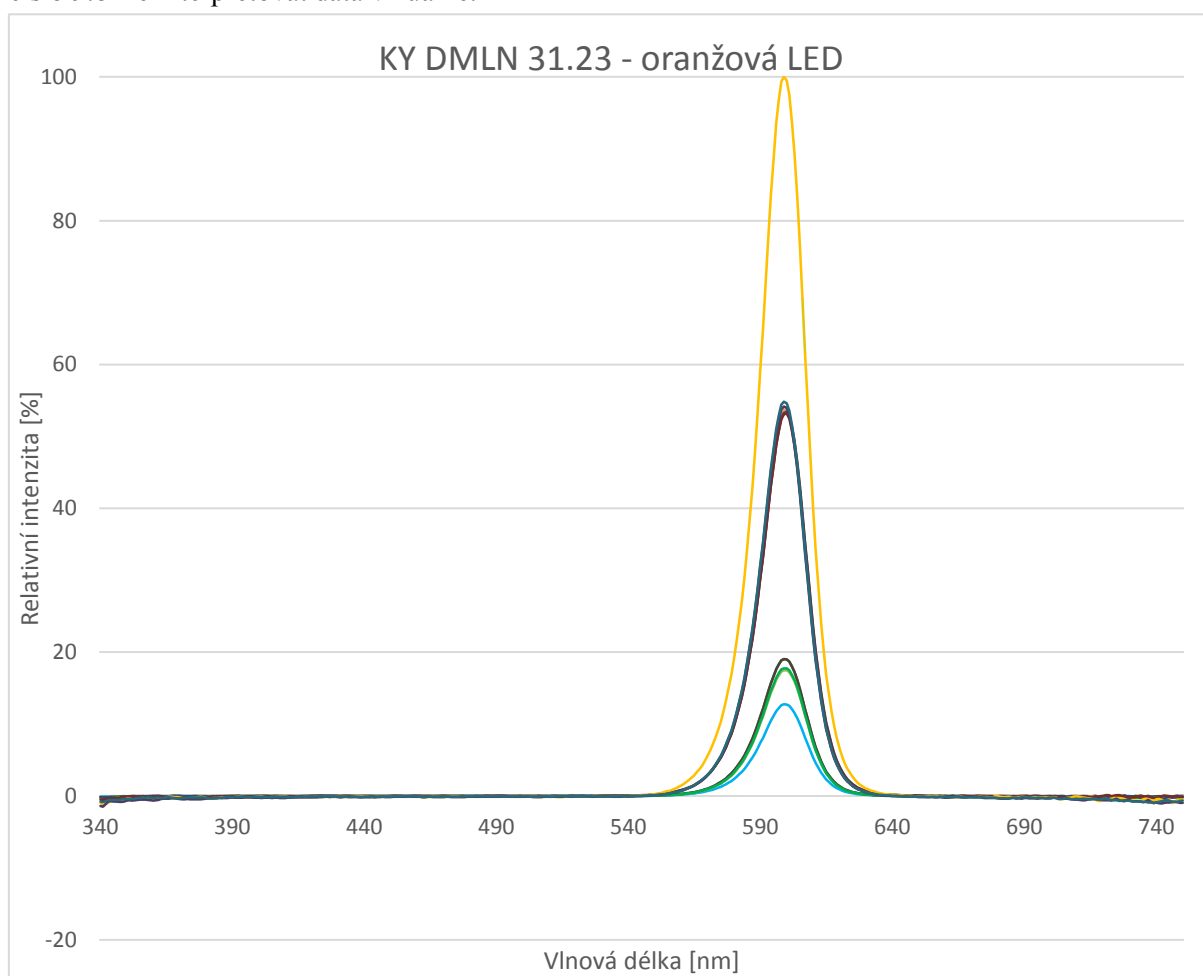
9.3.3 Výsledky měření - KY DMLN 31.23 – Oranžová LED

Tabulka číslo 9.4 zobrazuje naměřené hodnoty útlumů vyrobených světlovodů. Hodnota stálého pracovního proudu I_f pro oranžovou LED byla nastavena na **200 mA**. Nejprve byl měřen pouze samotný LED čip. Vstupní výkon odpovídal hodnotě **61,102 mW**, vstupní světelný tok pak odpovídal hodnotě **28,459 lm** a vlnová délka zdroje odpovídala hodnotě **599,56 nm**.

Tabulka 9.4: *Tabulka porovnávající hodnoty prvních a posledních kusů – oranžová LED*

Série	Číslo vzorku	Výstupní výkon [mW]	Výstupní světelný tok [lm]	Vlnová délka [nm]
1	1	11.47	5.28	599.56
	2	7.73	3.54	599.56
	3	10.30	4.83	599.56
	4	11.51	5.28	599.56
	5	10.35	4.91	599.56
Hodnoty průměru		10.27	4.77	599.56
Průměrný měrný útlum		0.5163	0.5171	[dB/cm]
Absorpční koeficient		0.11889		[m⁻¹]
7	31	32.77	14.96	599.56
	32	33.29	15.55	599.56
	33	32.80	14.87	599.56
	34	31.79	14.42	599.56
	35	31.69	14.67	599.56
8	36	35.49	16.38	599.56
	37	34.07	15.77	599.56
	38	33.10	15.94	599.56
	39	33.94	15.69	599.56
	40	32.05	15.41	599.56
9	41	34.23	15.84	599.56
	42	32.16	15.61	599.56
	43	33.64	17.08	599.56
	44	30.73	14.93	599.56
	45	31.77	15.14	599.56
10	46	32.45	15.37	599.56
	47	31.56	15.14	599.56
	48	30.64	0.18	599.56
	49	31.13	14.58	599.56
	50	32.46	15.09	599.56
Hodnoty průměru		32.59	14.631	599.56
Průměrný měrný útlum		0.1826	0.1926	[dB/cm]
Absorpční koeficient		0.04190		[m⁻¹]

Podobně jako u předchozího červeného LED zdroje i zde lze pozorovat téměř totožné výsledky. Rozdíly v hodnotách průměrného měrného útlumu prvních a posledních kusů jsou velmi značné. Měrný útlum prvních kusů činí **0,5163 dB/cm**, měrný útlum posledních vzorků je roven hodnotě **0,1826 dB/cm**. Průměrné hodnoty absorpčního koeficientu jsou pak pro nekvalitní světlovody **0,11889 m⁻¹** a pro kvalitní vzorky **0,0419 m⁻¹**. Vlnová délka, na které LED zdroj pracuje, má minimální vliv na naměřené výsledky. Je to učiněno také tím, že rozdíl vrcholů spekter červené a oranžové LED je pouze **25,45 nm**, takže pokud existují elementy, které ovlivňují útlum spektrálně výrazněji, aby se projevily, potřebují větší rozdíl ve vlnových délkách. Při pohledu na část tabulky, která zobrazuje nejvyšší naměřenou vlnovou délku jednotlivých měření, lze říci, že zde taktéž nedochází ani k minimálnímu posuvu, a to jak k delším, tak ke kratším vlnovým délkám. V těchto zjištěných parametrech se ani jedno měření neliší, pouze po průchodu světlovodu dochází k útlumu výkonu, a tento útlum je převážně způsobem rozptylem na nehomogenitách uvnitř světlovodu, či na nečistotách uvnitř nebo na povrchu světlovodu. V grafu číslo 9.8 lze interpretovat data vizuálně.



Obrázek 9.8: Graf – porovnání světlovodů – oranžová LED

Znovu 100% relativní intenzity představuje naměřené spektrum samotného oranžového LED čipu. Podobně jak v případě červeného LED zdroje zhruba poloviční amplituda znovu patří vzorkům kvalitním a úplně dole lze vidět spektra nekvalitních vzorků z první série výroby. Tento druhý graf potvrzuje, že průchodem světla světlovodem s PDMS se jeho spektrální křivka neposouvá k větším či menším vlnovým délkám. Je zde podruhé potvrzeno, že PDMS je materiálem opticky čistým.

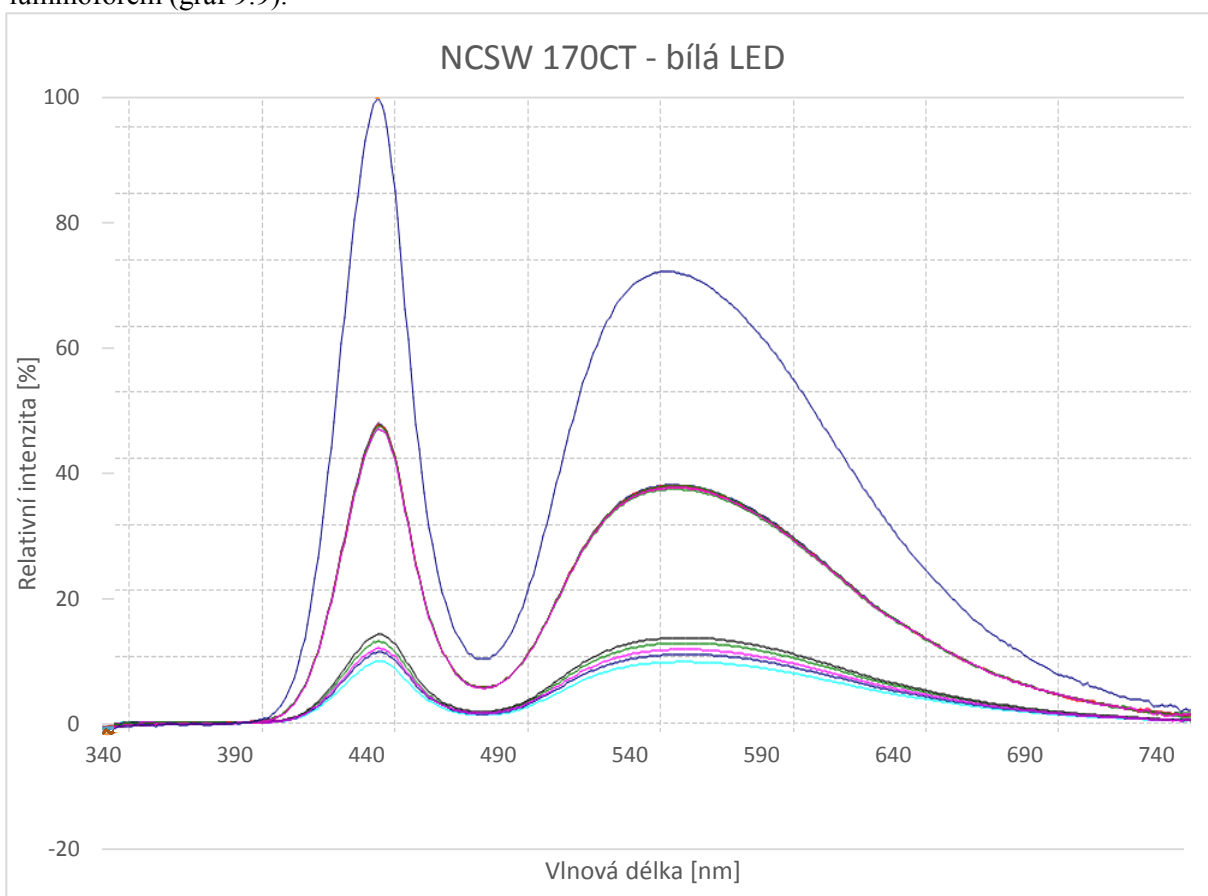
9.3.4 Výsledky měření – NCSW 170CT – Bílá LED

Tabulka číslo 9.5 zobrazuje naměřené hodnoty útlumů vyrobených světlovodů. Hodnota stálého pracovního proudu I_f pro bílou LED byla nastavena na **1200 mA**. Nejprve byl měřen pouze samotný LED čip. Vstupní výkon odpovídal hodnotě **1183,072 mW**, vstupní světelný tok odpovídal hodnotě **391,168 lm** a teplota chromatičnosti odpovídala hodnotě **5466**.

Tabulka 9.5: *Tabulka porovnávající hodnoty prvních a posledních kusů – bílá LED*

Série	Číslo vzorku	Výstupní výkon [mW]	Výstupní světelný tok [lm]	CCT [K]
1	1	195.62	68.64	4618.00
	2	149.87	52.33	4610.00
	3	168.83	58.82	4652.00
	4	210.55	73.32	4677.00
	5	179.97	63.13	4637.00
Hodnoty průměru		180.97	63.25	4638.80
Průměrný měrný útlum		0.5436	0.5275	[dB/cm]
Absorpční koeficient		0.12516		[m⁻¹]
7	31	613.93	206.20	5179.00
	32	612.47	205.49	5182.00
	33	604.33	202.59	5191.00
	34	608.13	204.19	5200.00
	35	611.99	205.50	5179.00
8	36	616.88	207.20	5201.00
	37	610.03	206.79	5219.00
	38	633.71	213.78	5184.00
	39	628.08	213.68	5179.00
	40	611.90	207.57	5182.00
9	41	623.48	211.33	5211.00
	42	615.12	206.76	5169.00
	43	615.26	208.50	5187.00
	44	623.59	209.56	5194.00
	45	620.49	208.76	5197.00
10	46	598.54	202.68	5191.00
	47	591.09	200.02	5173.00
	48	602.15	203.64	5191.00
	49	606.99	205.69	5175.00
	50	605.03	202.96	5210.00
Hodnoty průměru		612.66	206.6445	5189.70
Průměrný měrný útlum		0.1905	0.1848	[dB/cm]
Absorpční koeficient		0.04387		[m⁻¹]

Dochází zde k podobným hodnotám útlumu jako u předchozích měření s barevnými zdroji. Podle hodnot v tabulce lze říci, že se i třetím měřením potvrdilo zlepšení z hlediska výkonových ztrát. Hodnota měrného útlumu prvních kusů je rovna **0.5436 dB/cm** a kusy z posledních sérií vykazují útlum roven **0.1902 dB/cm**. Průměrné hodnoty absorpčního koeficientu jsou pak pro nekvalitní světlovody **0,12516 m⁻¹** a pro kvalitní vzorky **0.04387 m⁻¹**. Tyto výsledky korespondují s výsledky předchozích měření, avšak poměrně značný rozdíl je zde patrný. Jelikož zde použitý bílý LED zdroj přeměňuje světlo z modrého na bílé pomocí luminoforu, výsledná křivka spektra zasahuje téměř do všech oblastí viditelného spektra. Jdou zde vidět dvě výrazné amplitudy. Jedna užší na vlnové délce zhruba 440 nm a druhá širší na vlnové délce zhruba 555 nm. První amplituda ukazuje část výkonu modré LED, která nebyla absorbována luminoforem a druhá amplituda ukazuje křivku posunutého spektra směrem k větším vlnovým délkám odpovídající zhruba žluté barvě. Tato křivka představuje světlo emitované luminoforem (graf 9.9).



Obrázek 9.9: Graf – porovnání světlovodů – bílá LED

Rozdílné výsledky lze spatřit v hodnotách teploty chromatičnosti. U samotného zdroje byla naměřena průměrná hodnota **5 466 K**, kvalitní vzorky vykazovaly hodnotu **5 189 K** a nekvalitní vzorky vykazovaly hodnotu **4 638 K**. Teplota chromatičnosti se po průchodu světlovodem poměrně značně mění a to tak, že čím je vzorek méně kvalitní, tím se teplota chromatičnosti snižuje a světlo se jeví jako teplejší. Tato skutečnost vzniká vlivem rozdílných rozptylů různých vlnových délek. Menší vlnové délky se rozptylují v nekvalitních světlovodech více než větší, to znamená, že spektrální křivka představující modré světlo je více rozptylována než spektrální křivka žluté barvy. Tato skutečnost je způsobena jevem zvaným Mieův rozptyl, kdy nehomogenity ve formě nevypřchaných mikroskopických bublinek mají takovou velikost, že ovlivňují rozptyl modré složky světla více než složky žluté.

9.3.5 Shrnutí výsledků měření útlumu a spektrálního posuvu

Na základě měření jsem dokázal, že světlovody zhotovené z materiálu PDMS, neovlivňují za stálé teploty okolí, posuv vlnové délky procházejícího světla u červeného, oranžového i bílého LED zdroje. Výsledky také potvrdily razantní zlepšení optických vlastností světlovodů, které prošly vývojem výroby. Hodnoty absorpčního koeficientu se u kvalitních vzorků pohybovaly okolo **0,0425 m⁻¹**, a měrný útlum se u kvalitních vzorků pohyboval okolo hodnoty **0,19 dB/cm**. V některých případech zkvalitněním celého výrobního procesu došlo k zmenšení měrného útlumu posledních kusů světlovodů až na třetinu oproti prvním vzorkům.

Odpozoroval jsem, že uvnitř světlovodů existuje mnoho mikroskopických bublin. Množství těchto bublin se pravděpodobně, vlivem vystavení světlovodů vysokým teplotám, zmenšuje oproti samovolnému vytvrzení vzorků v pokojové teplotě. Tyto mikroskopické bubliny mají takovou velikost, že více rozptylují nižší vlnové délky než vyšší. Toto tvrzení potvrzuje i skutečnost, že nejmenší měrný útlum nekvalitních vzorků byl naměřen u červeného LED zdroje (**0,4953 dB/cm**), oranžový LED zdroj vykazoval průměrně již vyšší hodnoty (**0,5163 dB/cm**) a bílý LED zdroj zdaleka nejvyšší hodnoty měrného útlumu (**0,5436 dB/cm**).

Zjistil jsem, že toto úzce souvisí se změnou teploty chromatičnosti světla bílého zdroje po průchodu světlovodem s PDMS. Modrá složka světla je rozptylována výrazněji než žlutá, což má za následek, že po průchodu světla světlovodem se na detektor poměrově dostane méně modré složky světla než žluté. Jelikož se poměrem těchto dvou složek bílého světla ovlivňuje výsledná teplota chromatičnosti, výsledné hodnoty se posunují směrem k teplejším barvám a to u kvalitních světlovodů v průměru z hodnoty LED zdroje činící **5 466 K** na hodnotu **5 189 K** a u nekvalitních světlovodů dochází ještě k hlubšímu propadu na hodnotu **4 638 K**.

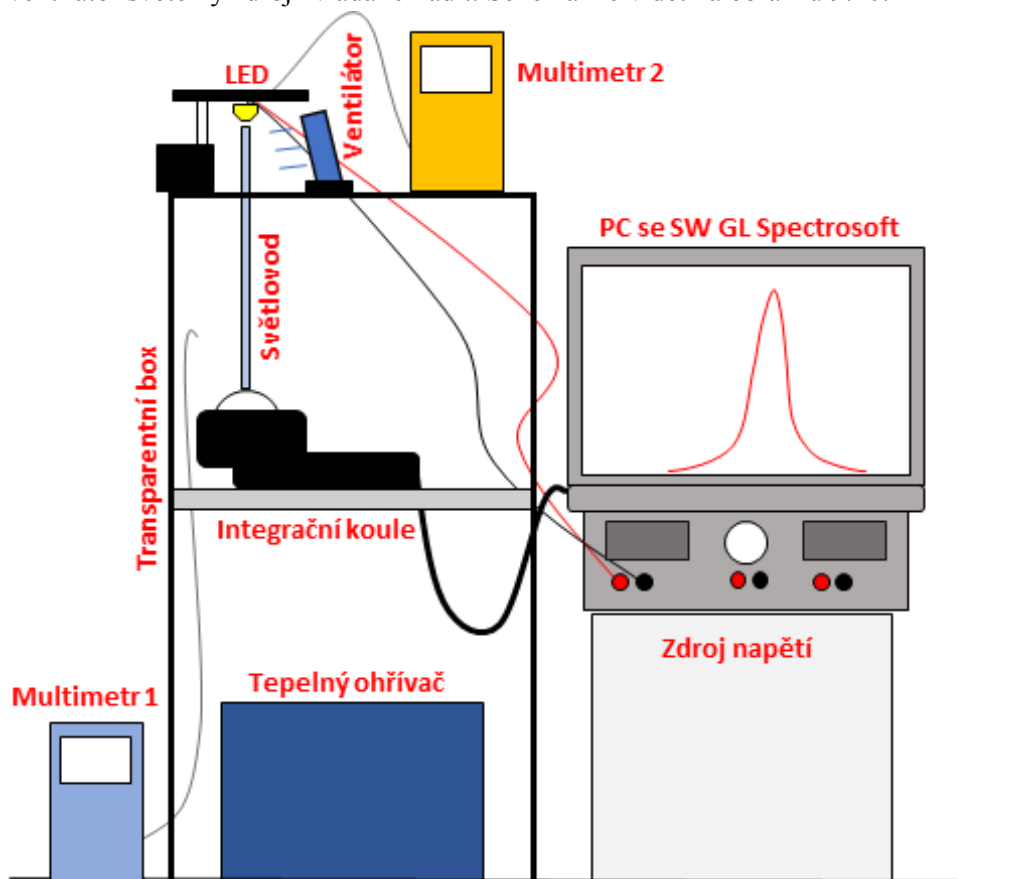
Zbývá měření je možno nalézt v příloze v přiloženém DVD.

9.4 Měření teplotních závislostí

Dalším úkolem je pomocí měření zkoumat vliv změny teploty okolního prostředí na optické vlastnosti světlovodů z PDMS. V tomto měření byly znovu použity 3 LED světelné zdroje, konkrétně červený, oranžový a bílý LED čip. Hodnota stálého pracovního proudu I_f pro červenou a oranžovou LED byla nastavena na **200 mA**. Pro bílou LED se I_f rovnal **1200 mA**. Postup měření byl takový, že jsem nejprve nechal vychladit box na 25 °C, poté jsem umístil světlovod do boxu a připevnil do fixační konstrukce a změřil spektrum, poté jsem zapnul ohřívač a uzavřel box. Po zahřátí vnitřního prostředí na 70 °C jsem 5 minut počkal a změřil výsledky. Posléze jsem box otevřel, přepnul elektrický ohřívač na chlazení a nechal prostředí vychladit na 25 °C. Tento postup jsem opakoval pro všech 10 měřených vzorků.

9.4.1 Popis měřicího pracoviště

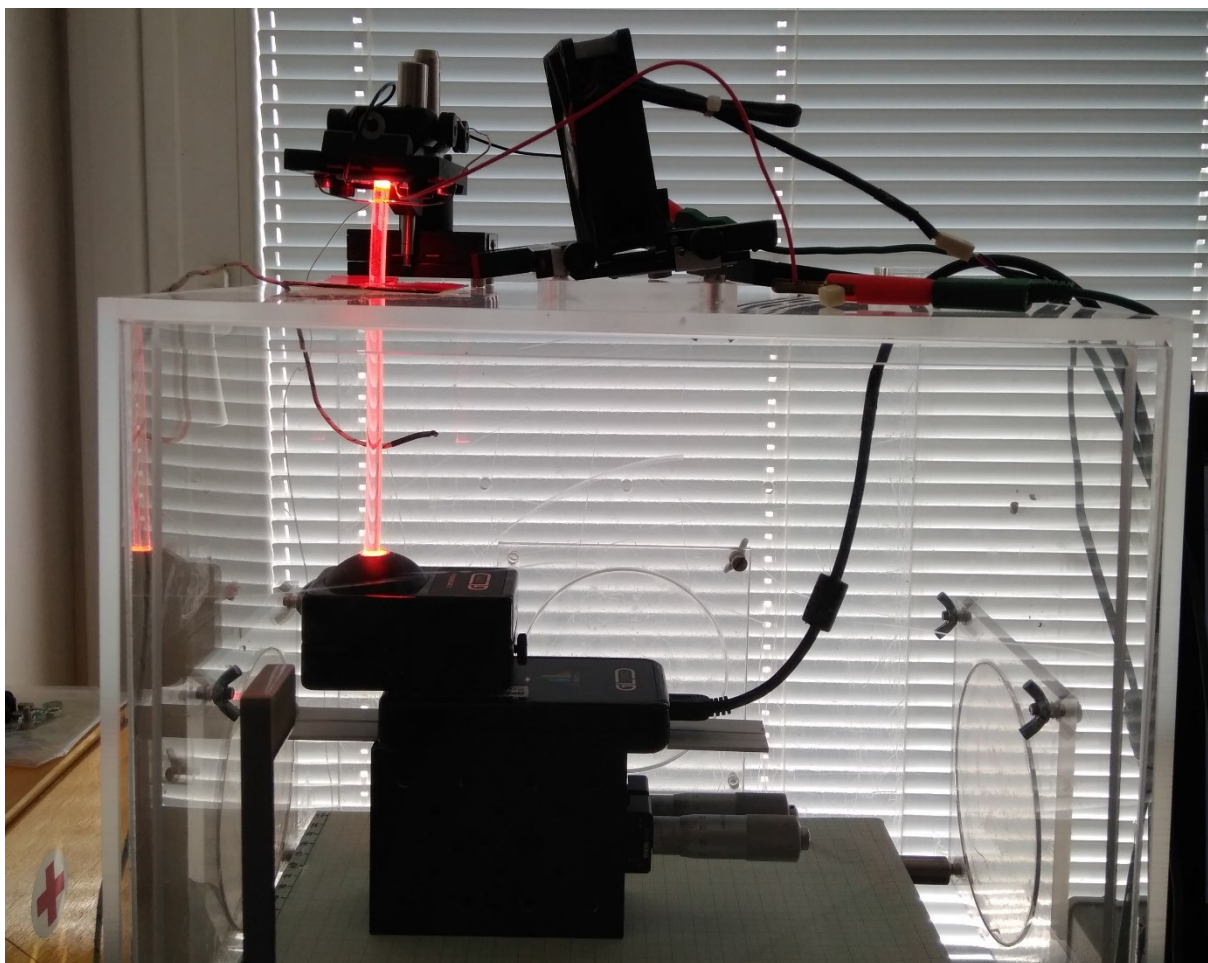
Sestrojit toto měřicí pracoviště bylo pravděpodobně nejobtížnější ze všech ostatních pracovišť. Důvodem byla skutečnost, že jsem musel oddělit prostor s LED čipem a prostor se světlovodem. Pro sestavení jsem potřeboval transparentní box s elektrickým ohřívačem vzduchu. Dovnitř boxu jsem umístil integrační kouli jako detektor, na spod boxu jsem umístil elektrický ohřívač a dírou na vrchní straně boxu jsem vsouval dovnitř světlovod, nad dírou byla zmenšená verze fixační konstrukce, která se starala o upevnění světlovodu a LED zdroje. Vedle této konstrukce byl instalován ventilátor, který měl za úkol udržovat LED čip ve stále stejné teplotě. V boxu se vždy nacházely $\frac{3}{4}$ světlovodu. Aby stoupající teplo nezhřívало přímo světelný zdroj, kolem světlovodu jsem umístil clonu zakrývající otvor do boxu. Poté už ventilátor světelný zdroj zvládal chladit. Schéma lze vidět na obrázku 9.10.



Obrázek 9.10: Schéma pracoviště měření teplotních závislostí

Multimetrem č. 1 jsem snímal teplotu uvnitř boxu. Multimetrem č. 2 jsem snímal teplotu samotného LED čipu. Elektrický tepelný ohřívač nebyl příliš teplotně stabilní. Teplota uvnitř boxu oscilovala od 65 °C do 75 °C, takže střední hodnota se pohybovala zhruba okolo 70 °C. Toto byla maximální teplota, které šlo uvnitř boxu tímto elektrickým ohřívačem dosáhnout.

Ventilátor, který chladil výkonový LED čip, byl neustále zapnutý. Teplota LED čipu se mírně měnila. Při 25 °C teploty okolí měl červený a oranžový LED zdroj teplotu také 25 °C, ovšem po zahřátí prostředí v boxu pod ním ventilátor nebyl dostatečně výkonný, aby teplotu udržel neměnnou. Teplota se zvýšila zhruba o čtyři až pět desetin stupně směrem nahoru na teploty okolo 25,5 °C. U bílého výkonového zdroje se teplota zvýšila o jeden celý teplotní stupeň na 26 °C. I tento mírný nárůst by však mohl mít mírný vliv na výsledné naměřené hodnoty. Na následujícím obrázku 9.11 je možno vidět fotografii detailu horní poloviny boxu s přesným rozestavením komponent.



Obrázek 9.11: *Detail pracoviště pro měření teplotních závislostí*

Z důvodů velikosti a rozlehlosti transparentního teplotního boxu jsem si v tomto měření musel vystačit pouze se zatemněním místnosti.

9.4.2 Výsledky měření - KR DMLN 31.23 – Červená LED

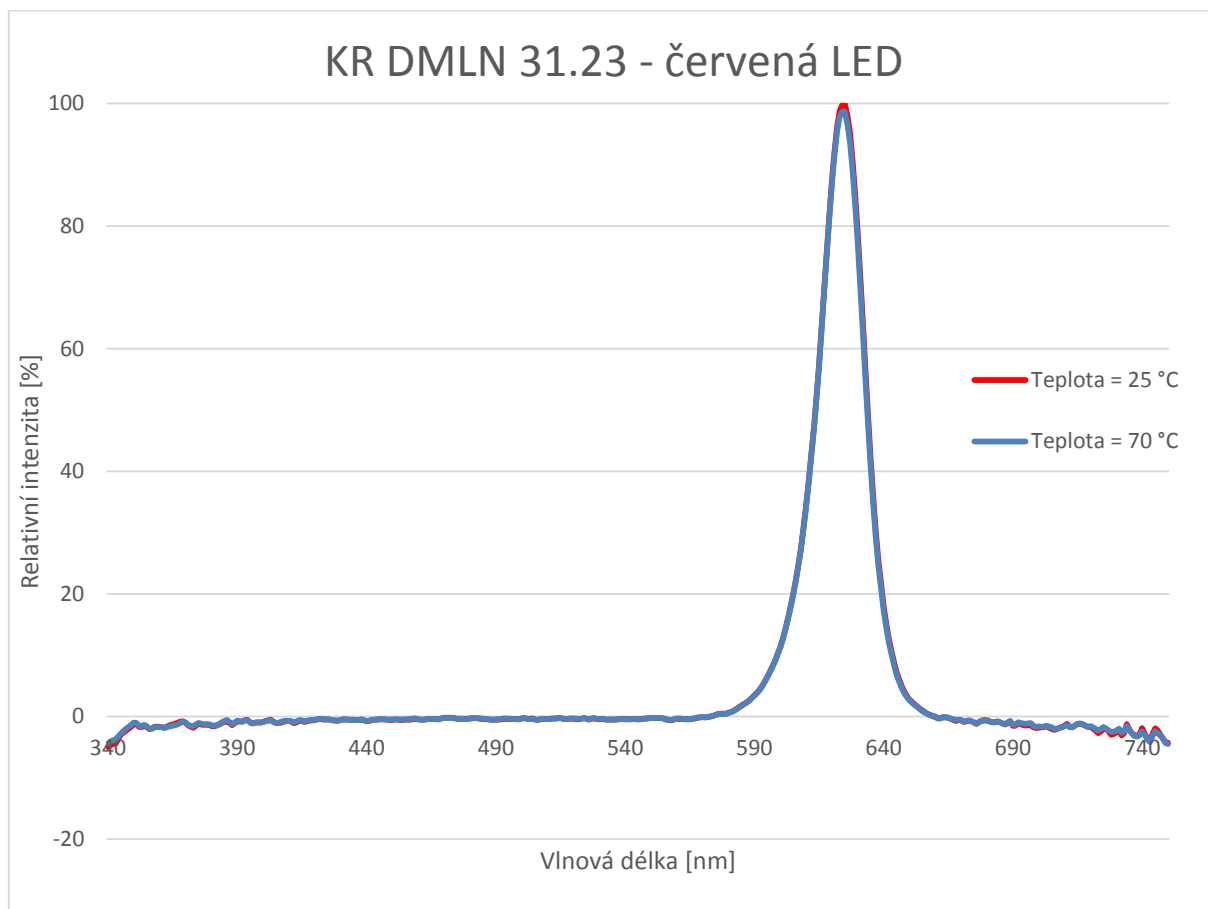
Tabulka číslo 9.6 zobrazuje naměřené hodnoty útlumů vyrobených světlovodů za různé teploty okolního prostředí. V horní části jsou zobrazeny výsledky měření pro teplotu prostředí 25 °C spolu s průměrnou hodnotou útlumu všech 10ti měření. Ve spodní části jsou pak tytéž hodnoty ale pro teplotu vnitřního prostředí 70 °C. V pravé části tabulky lze vidět naměřenou vlnovou délku spektra pro obě měřené teploty.

Tabulka 9.6: Tabulka znázorňující teplotní změny – červená LED

Vzorky	25 °C		
	Výstupní výkon [mW]	Výstupní světelný tok [lm]	Vlnová délka [nm]
Vzorek 1	47.04	13.16	625.01
Vzorek 2	45.95	12.81	625.01
Vzorek 3	46.88	13.16	625.01
Vzorek 4	49.10	13.22	625.01
Vzorek 5	46.18	12.85	625.01
Vzorek 6	50.03	13.90	625.01
Vzorek 7	50.62	14.08	625.01
Vzorek 8	48.02	13.26	625.01
Vzorek 9	48.15	13.41	625.01
Vzorek 10	47.92	13.37	625.01
Průměr hodnot	47.99	13.32	625.01
Změna teploty	70 °C		
Vzorek 1	47.01	13.09	625.01
Vzorek 2	46.11	12.89	625.01
Vzorek 3	45.87	13.02	625.01
Vzorek 4	47.11	13.07	625.01
Vzorek 5	45.29	12.75	625.01
Vzorek 6	49.91	13.87	625.01
Vzorek 7	50.45	14.03	625.01
Vzorek 8	47.44	13.20	625.01
Vzorek 9	48.19	13.34	625.01
Vzorek 10	48.07	13.35	625.01
Průměr hodnot	47.55	13.26	625.01

Po prohlédnutí výsledků naměřených hodnot v tabulce, je patrné, že k útlumu optického výkonu vlivem změny teploty okolí dochází. Ovšem jedná se o téměř zanedbatelné rozdíly. Průměrné hodnoty výstupního výkonu při teplotě 25 °C jsou **47,99 mW** a průměrné hodnoty výstupního výkonu při teplotě 70 °C jsou **47,55 mW**. Jedná se o pokles výkonu pohybující se pouze okolo **1%**. Při pohledu na hodnoty vlnové délky lze vidět, že teplota tyto hodnoty nijak neovlivňuje. Vlnová délka je stále **625,01 nm**.

V následujícím grafu 9.12 můžeme vidět jednotlivá spektra v různých teplotách prostředí.



Obrázek 9.12: Graf teplotní závislosti PDMS světlovodů u červené LED

Červená křivka spektra představuje hodnoty při 25 °C a je průměrem všech 10ti naměřených vzorků. Modrá křivka spektra představuje hodnoty při 70 °C a je taktéž průměrem všech 10ti naměřených vzorků. Na grafu lze vidět, že jednotlivá spektra se téměř překrývají, což odpovídá výsledkům zobrazeným v tabulce. I zde se potvrzuje, že můžeme pozorovat pouze minimální změnu výstupního výkonu způsobenou změnou teploty z 25 °C na 70 °C u PDMS světlovodů. Skutečnost, že se spektra překrývají, potvrzuje i teplotní spektrální stálost materiálu PDMS při této teplotě. Nedochází zde k žádnému posuvu vlnových délek.

9.4.3 Výsledky měření - KY DMLN 31.23 – Oranžová LED

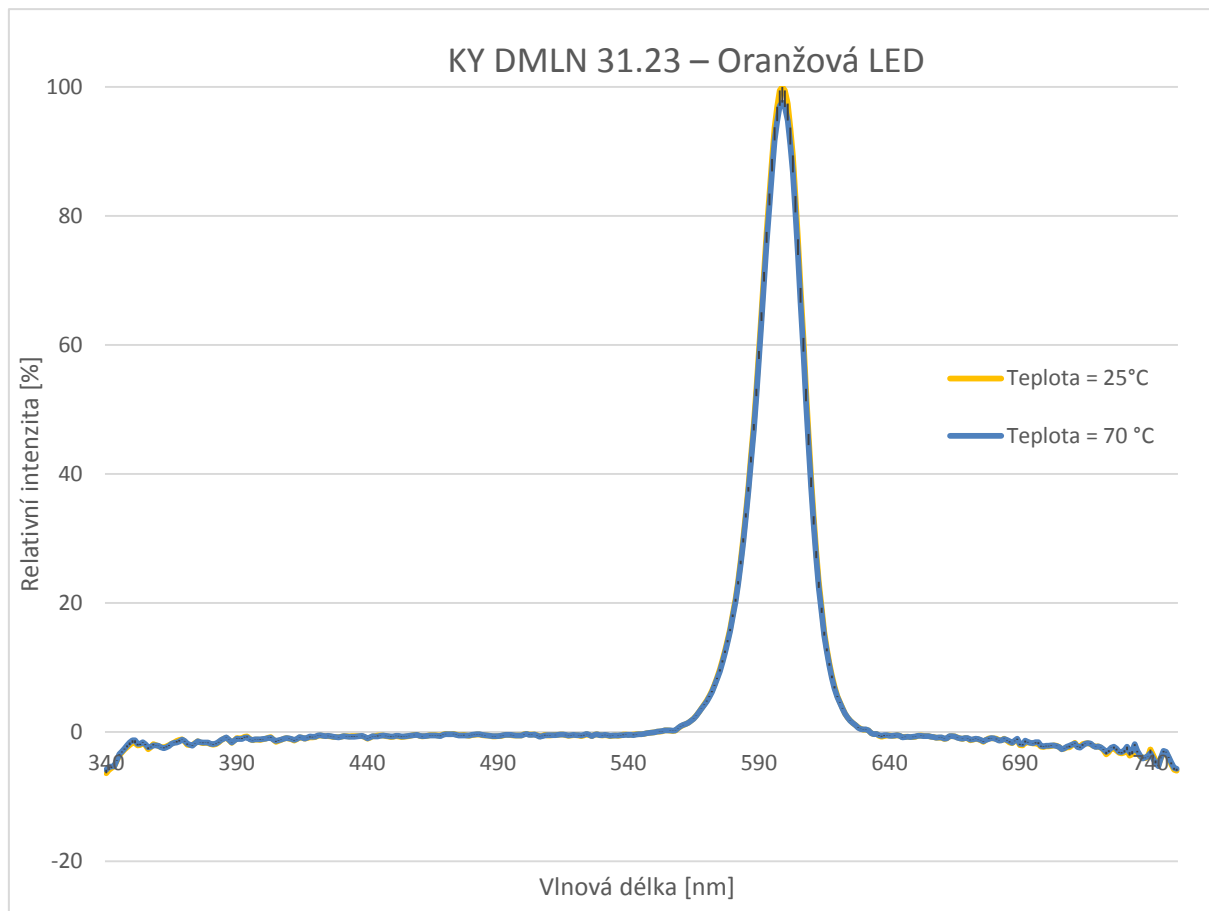
Tabulka číslo 9.7 zobrazuje naměřené hodnoty útlumů vyrobených světlovodů za různé teploty okolního prostředí. V horní části jsou zobrazeny výsledky měření pro teplotu prostředí 25 °C spolu s průměrnou hodnotou útlumu všech 10ti měření. Ve spodní části jsou pak tytéž hodnoty ale pro teplotu vnitřního prostředí 70 °C. V pravé části tabulky lze vidět naměřenou vlnovou délku spektra pro obě měřené teploty.

Tabulka 9.7: Tabulka znázorňující teplotní změny – oranžová LED

Vzorky	25 °C		
	Výstupní výkon [mW]	Výstupní světelný tok [lm]	Vlnová délka [nm]
Vzorek 1	22.42	11.72	599.56
Vzorek 2	22.07	11.85	599.56
Vzorek 3	22.87	12.21	599.56
Vzorek 4	20.89	11.45	599.56
Vzorek 5	21.8	11.58	599.56
Vzorek 6	23.24	12.51	599.56
Vzorek 7	23.59	12.77	599.56
Vzorek 8	22.19	12.11	599.56
Vzorek 9	20.27	11.17	599.56
Vzorek 10	21.43	11.84	599.56
Průměr hodnot	22.08	11.92	599.56
Změna teploty	70 °C		
Vzorek 1	21.85	11.61	599.56
Vzorek 2	22.05	11.78	599.56
Vzorek 3	22.54	12.13	599.56
Vzorek 4	20.79	11.3	599.56
Vzorek 5	21.54	11.43	599.56
Vzorek 6	23.07	12.41	599.56
Vzorek 7	23.36	12.66	599.56
Vzorek 8	21.69	11.78	599.56
Vzorek 9	19.76	10.89	599.56
Vzorek 10	21.43	11.84	599.56
Průměr hodnot	21.81	11.78	599.56

Podobně jako u červeného LED zdroje i zde dochází k mírnému útlumu výkonu. Průměrné hodnoty výstupního výkonu za teploty prostředí 25 °C se rovnají **22,08 mW**, kdežto průměrné hodnoty výstupního výkonu za teploty prostředí 70 °C se rovnají **21,81 mW**. Taktéž v tomto případě se jedná o pokles výkonu zhruba o **1%**. Pokud zhodnotíme naměřené vlnové délky, zjistíme, že ani zde nedošlo k žádnému posuvu. Naměřená vlnová délka byla ve všech případech **599,56 nm**.

Následující graf 9.13 ukazuje spektrální křivky oranžového LED zdroje za zmíněných dvou rozdílných teplot okolí.



Obrázek 9.13: *Graf teplotní závislosti PDMS světlovodů u oranžové LED*

Oranžová křivka spektra představuje hodnoty při 25 °C a je znovu průměrem všech 10ti naměřených vzorků. Modrá křivka spektra představuje hodnoty při 70 °C a je taktéž průměrem všech 10ti naměřených vzorků. Situace je zde v podstatě stejná jako u červeného LED zdroje. Dochází k minimálnímu útlumu a jednotlivá spektra se přes sebe znovu překrývají, což je ukazatelem toho, že se potvrzuje opět teplotně spektrální stálost PDMS při teplotě 70 °C.

9.4.4 Výsledky měření – NCSW 170CT – Bílá LED

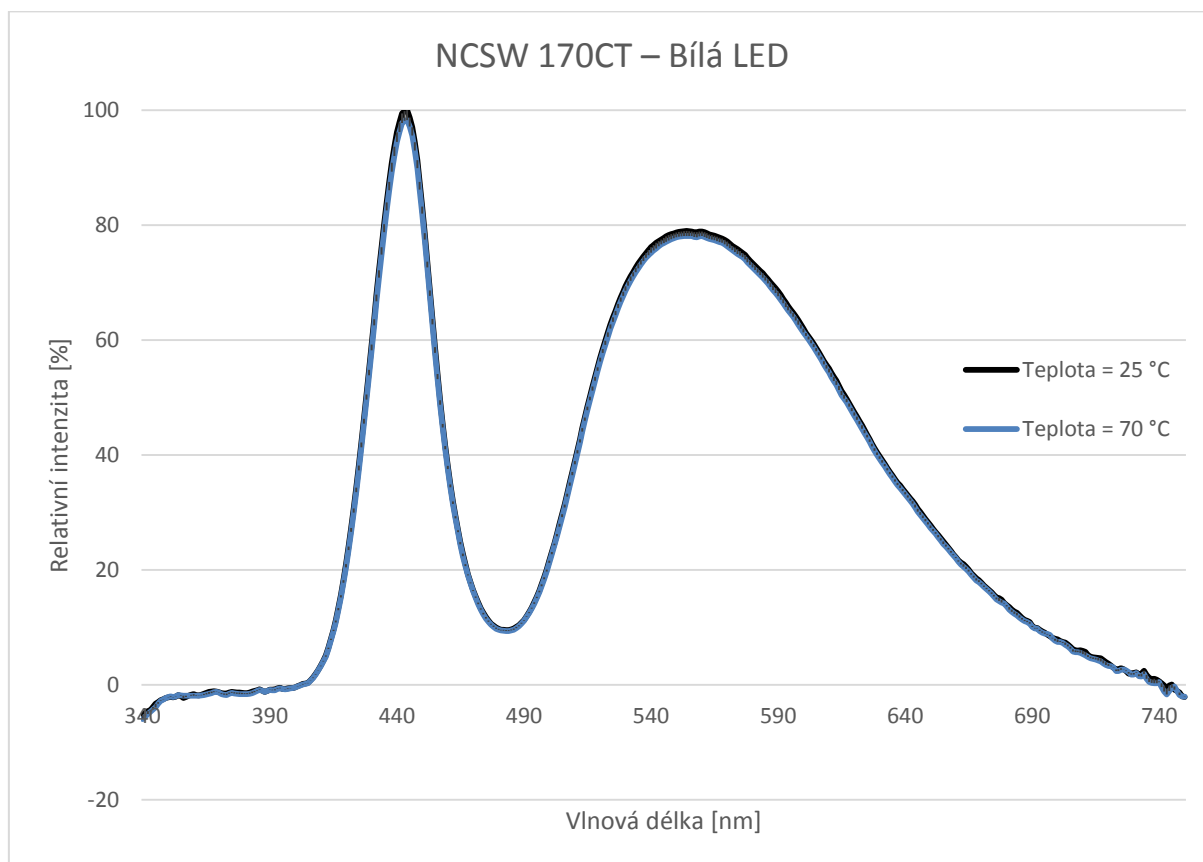
Tabulka číslo 9.8, stejně jako v předchozích případech, zobrazuje naměřené hodnoty útlumů vyrobených světlovodů za různé teploty okolního prostředí. V horní části jsou zobrazeny výsledky měření pro teplotu prostředí 25 °C spolu s průměrnou hodnotou útlumu všech 10ti měření. Ve spodní části jsou pak tytéž hodnoty ale pro teplotu vnitřního prostředí 70 °C. V pravé části tabulky pak lze vidět naměřené hodnoty teploty chromatičnosti jednotlivých vzorků pod zkratkou CCT.

Tabulka 9.8: Tabulka znázorňující teplotní změny – bílá LED

Bílá LED	25 °C		
	Výstupní výkon [mW]	Výstupní světelný tok [lm]	CCT [K]
Vzorek 1	591.00	202.81	5114.00
Vzorek 2	595.81	204.61	5116.00
Vzorek 3	585.58	201.69	5081.00
Vzorek 4	562.69	193.77	5074.00
Vzorek 5	578.84	199.90	5083.00
Vzorek 6	583.41	201.76	5118.00
Vzorek 7	614.92	212.30	5116.00
Vzorek 8	574.41	198.41	5101.00
Vzorek 9	581.79	201.25	5119.00
Vzorek 10	593.11	205.41	5111.00
Průměr hodnot	586.16	202.19	5103.30
Změna teploty	70 °C		
Vzorek 1	582.70	200.30	5091.00
Vzorek 2	592.00	203.57	5085.00
Vzorek 3	574.85	198.86	5063.00
Vzorek 4	554.91	192.16	5054.00
Vzorek 5	570.00	197.66	5072.00
Vzorek 6	574.76	199.13	5080.00
Vzorek 7	608.08	209.65	5092.00
Vzorek 8	567.64	196.58	5085.00
Vzorek 9	582.14	200.86	5139.00
Vzorek 10	590.78	204.72	5102.00
Průměr hodnot	579.79	200.35	5086.30

Hodnoty v tabulce ukazují, že ani bílý LED zdroj není, co se týče spektrálního chování vlivem teploty prostředí, výjimkou. Můžeme zde pozorovat znovu velmi mírný pokles výkonu, který se rovná zhruba **1%**. Výstupní výkon při 25 °C dosahuje hodnoty **586,16 mW** a po zahřátí na 70 °C vykazuje velmi mírný pokles na hodnotu **579,79 mW**. Pokud se zaměříme na pravou část tabulky, tak můžeme vidět, že teplota chromatičnosti taktéž mírně poklesla. Z průměrné hodnoty **5 103,3 K** na **5 086,3 K**. Tato skutečnost naznačuje, že vliv teploty na útlum optického výkonu, po průchodu světla světlovody z PDMS, bude taktéž mírně spektrálně závislý, jelikož došlo k mírnému snížení hodnoty teploty

chromatičnosti. Tento jev nám u bílého LED zdroje používající luminofor vždy naznačuje, že modrá složka světla byla utlumena mírně více než žlutá. Z graf 9.14, který znovu vizualizuje data formou spektrálních křivek.



Obrázek 9.14: *Graf teplotní závislosti PDMS světlovodů u bílé LED*

Černá křivka spektra představuje hodnoty při 25 °C a je průměrem všech 10ti naměřených vzorků. Modrá křivka spektra představuje hodnoty při 70 °C a je taktéž průměrem všech 10ti naměřených vzorků. Na grafu lze pozorovat, že znovu dochází k nepatrnému útlumu výkonu při teplotě 70 °C. Pozorným prozkoumáním grafu lze zjistit, že i vizuálně vrchol amplitudy, představující modrou složku světla zhruba na vlnové délce 440 nm, je ponížena mírně více než vrchol amplitudy žluté složky spektra zhruba s vrcholem na vlnové délce 550 nm. Se zvyšující se teplotou se mění velikost rozptylových center. Mění se tedy průměr mikroskopických vzduchových bublinek, které svou změnou velikosti více ovlivňují kratší vlnové délky než ty delší.

Ani zde nedochází k posuvu spekter směrem k větším, nebo menším vlnovým délkám.

9.4.5 Shrnutí výsledků měření teplotních závislostí

Výsledky měření všech tří výkonových LED čipů ukázaly, že světlovody zhotovené z materiálu PDMS jsou teplotně velmi stáله, z hlediska útlumových i spektrálních vlastností. Toto však můžeme tvrdit pouze o teplotní stálosti v teplotě prostředí 70 °C. Nelze z tohoto zjištěného faktu vyvozovat, že se takto PDMS materiál chová i při vyšších teplotách. Zvýšená teplota na hodnotu 70 °C jen velmi nepatrně snižovala výkon na výstupu světlovodu a to zhruba o **1%**. Tento pokles však ve většině aplikací v praxi je téměř zanedbatelný. Výsledky mohla mírně ovlivnit změna teploty světelného zdroje při probíhajícím měření. Barevné výkonové zdroje se zahřály zhruba na teplotu 25,5 °C a bílý zdroj zhruba na 26 °C. Pokud mimo jiné přihlédneme k faktu, že bílý zdroj byl mírně více utlumen. Je pravděpodobné, že i takováto nepatrná změna teploty LED zdrojů mohla mít vliv na výsledky měření.

U všech tří zdrojů se také ukázalo, že vlivem změny teploty nedochází k žádnému spektrálnímu posuvu naměřené vlnové délky. Vlnová délka u všech měření byla vždy konstantní. Toto zjištění znovu potvrzuje optickou a tepelnou stálost materiálu PDMS. Pouze v případě bílého zdroje došlo k mírnému poklesu teploty chromatičnosti z hodnoty **5 103,3 K** na hodnotu **5 086,3 K**. Tento fakt říká, že vliv zvýšení teploty materiálu, ve kterém se světlo šíří, mírně více utlumuje krátké vlnové délky než dlouhé. Jedním z důvodů proč se tak děje je skutečnost změn velikosti rozptylových center vlivem zvyšující se teploty.

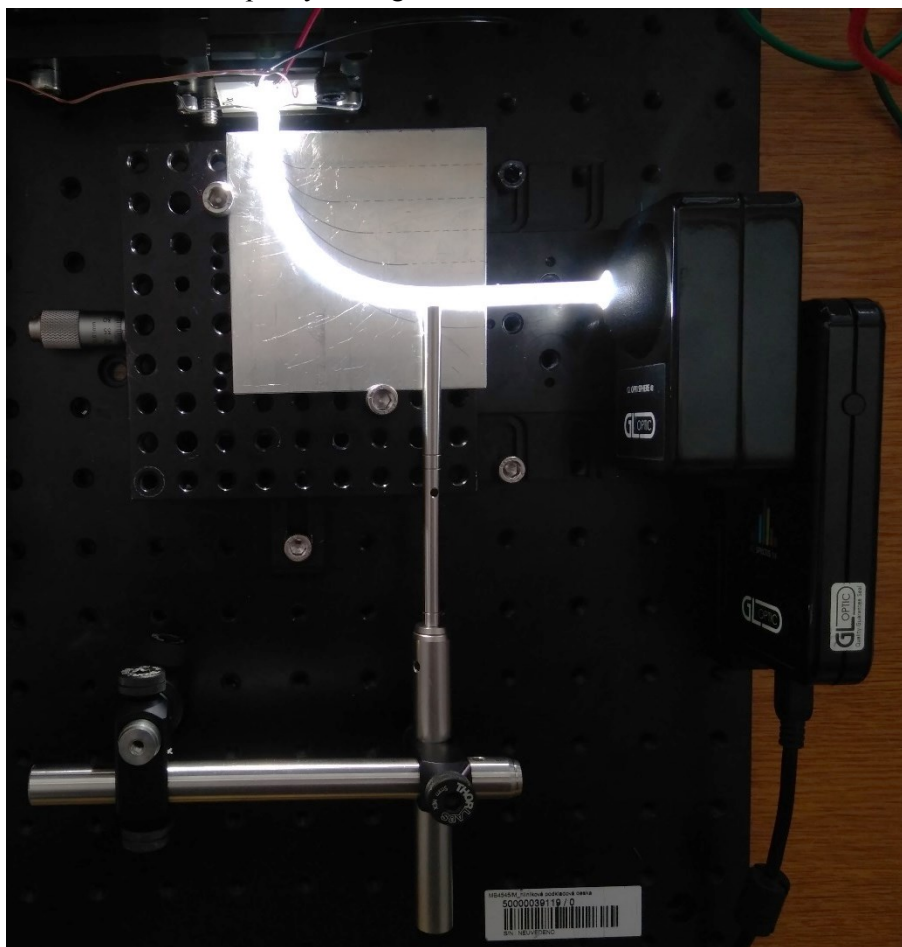
Zbylá měření je možno nalézt v příloze v přiloženém DVD.

9.5 Měření ohybových ztrát

Zadání této práce jsem rozšířil o měření ohybových ztrát. V praxi se totiž ohybové ztráty u světlovodů vyskytují poměrně často a je vhodné doplnit k dalším měřeným parametrům i tento. V tomto případě probíhalo měření na dvou výkonových LED čípech, konkrétně na červeném a bílém LED zdroji. Hodnota stálého pracovního proudu I_f pro červenou LED byla nastavena na **200 mA**. Pro bílou LED se I_f rovnal **1200 mA**. Samotné měření probíhalo tak, že jsem si vždy nejprve referenčně změřil výkon na výstupu napřímeného světlovodu a poté jej začal ohýbat o 90° s poloměry ohybu 6 – 1 cm s krokem jeden cm podle předem připravených čar narýsovaných na hliníkové podložce. Jednotlivé hodnoty jsem poté přepočítával na procentuální poměr k referenčnímu výkonu bez ohybu. Tento postup jsem dodržel u všech 10ti vzorků.

9.5.1 Popis měřicího pracoviště

Měřicí pracoviště se skládalo z mírně modifikované fixační konstrukce pro LED čip a světlovod, dále nezbytnou součástí byla hliníková deska, na kterou jsem narýsoval jednotlivé poloměry ohybu od 6 cm po 1 cm s ohybem o 90° . Poté byla důležitou součástí posuvná konstrukce, jejíž rameno se dalo posouvat horizontálně i vertikálně. Tato konstrukce měla za úkol zafixovat světlovody v jednotlivých tvarech ohybů. Detektorem zde opět byla integrační koule. Toto rozestavení lze vidět na obrázku 9.15.



Obrázek 9.15: Měřicí pracoviště ohybových ztrát

Schéma měření je téměř totožné se schématem použitým v první kapitole při měření útlumu. Z tohoto důvodu zde pouze uvádím fotografii měřicího pracoviště. Zde jsem znovu používal zatemňovací box.

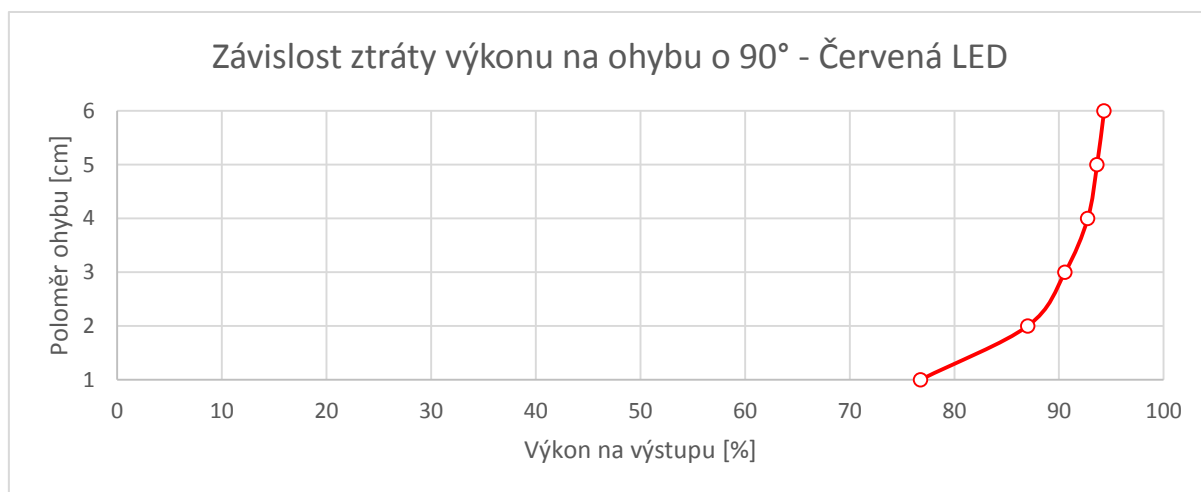
9.5.2 Výsledky měření - KR DMLN 31.23 – Červená LED

Tabulka číslo 9.9 zobrazuje naměřené hodnoty výkonů vyrobených světlovodů pod vlivem různých poloměrů ohybů. Tabulka je sestavena tak, že v levé její části vidíme jednotlivé poloměry, pod kterými byl světlovod ohýbán, dále pak výstupní výkon ze světlovodu po ohybech a přepočet na procentuální pokles vzhledem k referenční hodnotě výkonu světlovodu bez ohybu. V pravé části tabulky pak lze vidět průměrný procentuální pokles všech 10ti měřených vzorků. Pro názornost a přehlednost byl vybrán jeden vzorek nejvíce odpovídající průměrům všech vzorků. To vše pro červený LED zdroj.

Tabulka 9.9: Tabulka znázorňující ohybové ztráty – červená LED

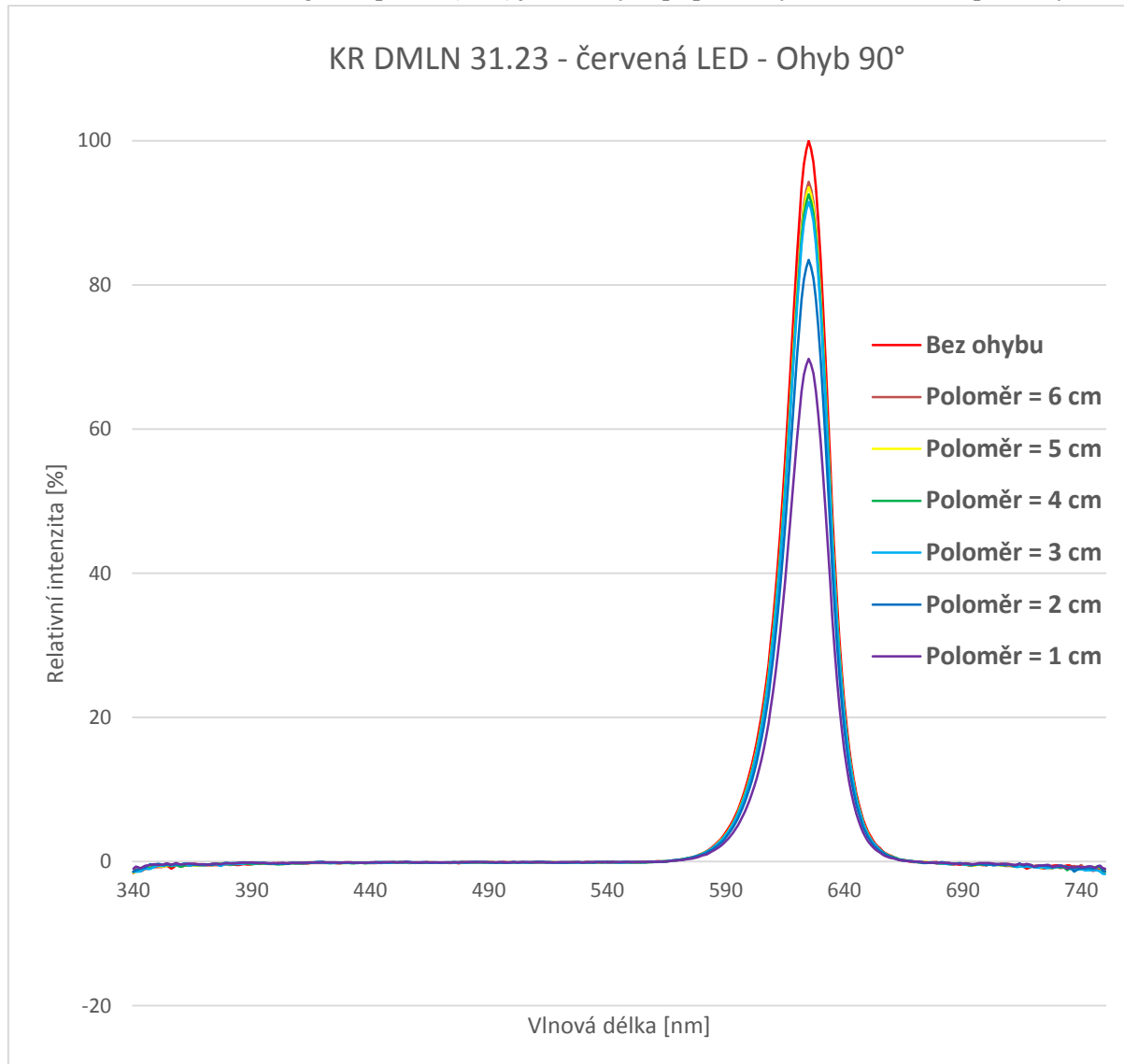
Závislost ztráty výkonu na poloměru ohybu o 90° - Červená LED			
Vzorek	Výstupní výkon [mW]	Pokles 1 vzorku [%]	Pokles všech vzorků [%]
Bez ohybu	64.66	100.00	100.00
R = 6 cm	60.68	93.84	94.31
R = 5 cm	60.47	93.52	93.64
R = 4 cm	59.06	91.34	92.75
R = 3 cm	58.40	90.32	90.58
R = 2 cm	54.90	84.91	87.01
R = 1 cm	50.53	78.15	76.77

V tabulce můžeme vidět, že i poměrně velký poloměr ohybu o velikosti 6 cm už měl vliv na ztrátu optického výkonu a to zhruba o **5 %**. U hodnot ohybu od 6 do 4 cm dochází sice postupně k vyšším ztrátám optického výkonu, ovšem jsou zde patrné pouze minimální poklesy celkově zhruba o **3%**. Trend se začíná měnit u hodnot ohybů 3 – 1 cm. Zde dochází k postupně k čím dál tím výraznějším ztrátám. Od hodnot **90,58%** výstupního výkonu při ohybu o poloměru 3 cm k hodnotám **76,77%** při ohybu o poloměru 1 cm. Zde už lze vidět rozdíl **13,81 %** poklesu výkonu. Celkově pak při ohybu světlovodu o poloměru ohybu 1 cm dochází ke ztrátě **23,23 %** oproti referenčnímu výkonu bez jakéhokoliv ohybu. V obrázku 9.16 lze pozorovat tytéž výsledky znázorněné formou grafu s body hodnot procentuálních výkonů daných poloměrů ohybů proložených křivkou. Tvar křivky připomíná exponenciální funkci.



Obrázek 9.16: Graf křivky ztrát – Červená LED

Graf potvrzuje významnou změnu trendu při ohybech o poloměru 3 a méně cm. Tato data jsou navíc níže vizualizována formou grafu spekter (9.17) jednotlivých případů ohybů, kde lze vidět podobný trend.



Obrázek 9.17: *Graf spekter ztrát – Červená LED*

Zde je znovu možno vidět graf téhož vzorku, který nejvíce odpovídá průměrným hodnotám všech 10ti naměřených vzorků. Spektrum s nejvyšší amplitudou má červenou barvu a představuje naměřené výkonové hodnoty světlovodu před procesem ohýbání. Poté i zde lze pozorovat shluk spekter o poloměrech ohybu s velikostí **6 – 4 cm**, kde nedochází téměř k žádným výrazným změnám ztrát výkonu. Ovšem změnu trendu lze vidět i zde. U ohybů o **3 cm** a méně dochází k výraznému snižování amplitud spekter, což značí výrazné ztráty optického výkonu.

Podle předpokladů bylo potvrzeno, že pouhý ohyb světlovodů neovlivňuje posunutí spektra k jiným vlnovým délkám.

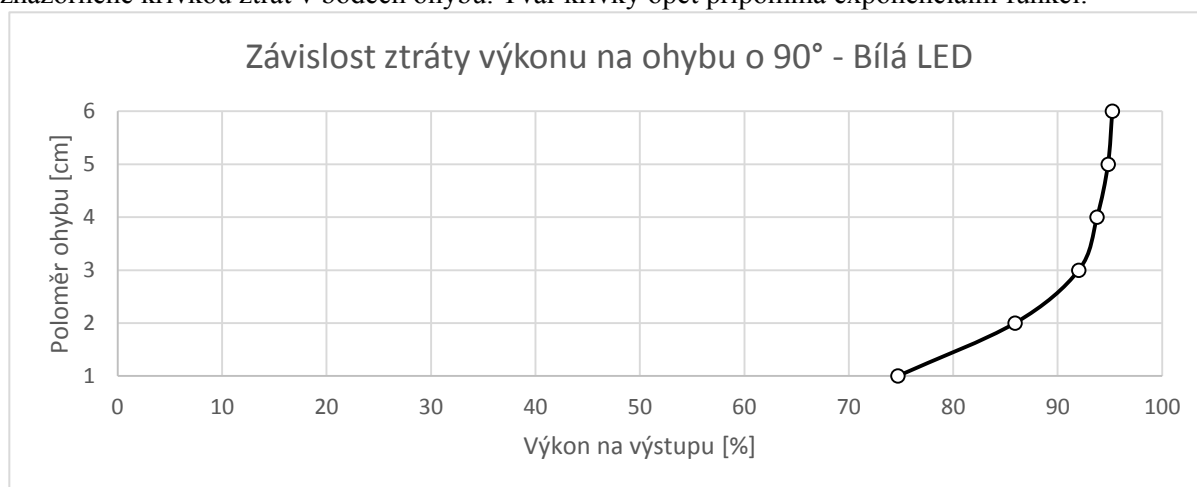
9.5.3 Výsledky měření – NCSW 170CT – Bílá LED

Tabulka číslo 9.10 zobrazuje naměřené hodnoty výkonů vyrobených světlovodů pod vlivem různých poloměrů ohybů. Tabulka je sestavena tak, že v levé její části vidíme jednotlivé poloměry, kterými byl světlovod ohýbán, dále pak výstupní výkon ze světlovodu po ohybech a přepočet na procentuální pokles vzhledem k referenční hodnotě výkonu světlovodu bez ohybu. V pravé části tabulky pak lze vidět průměrný procentuální pokles všech 10ti měřených vzorků. Pro názornost a přehlednost byl vybrán jeden vzorek nejvíce odpovídající průměrům všech vzorků. To vše pro bílý LED zdroj.

Tabulka 9.10: *Tabulka znázorňující ohybové ztráty – bílá LED*

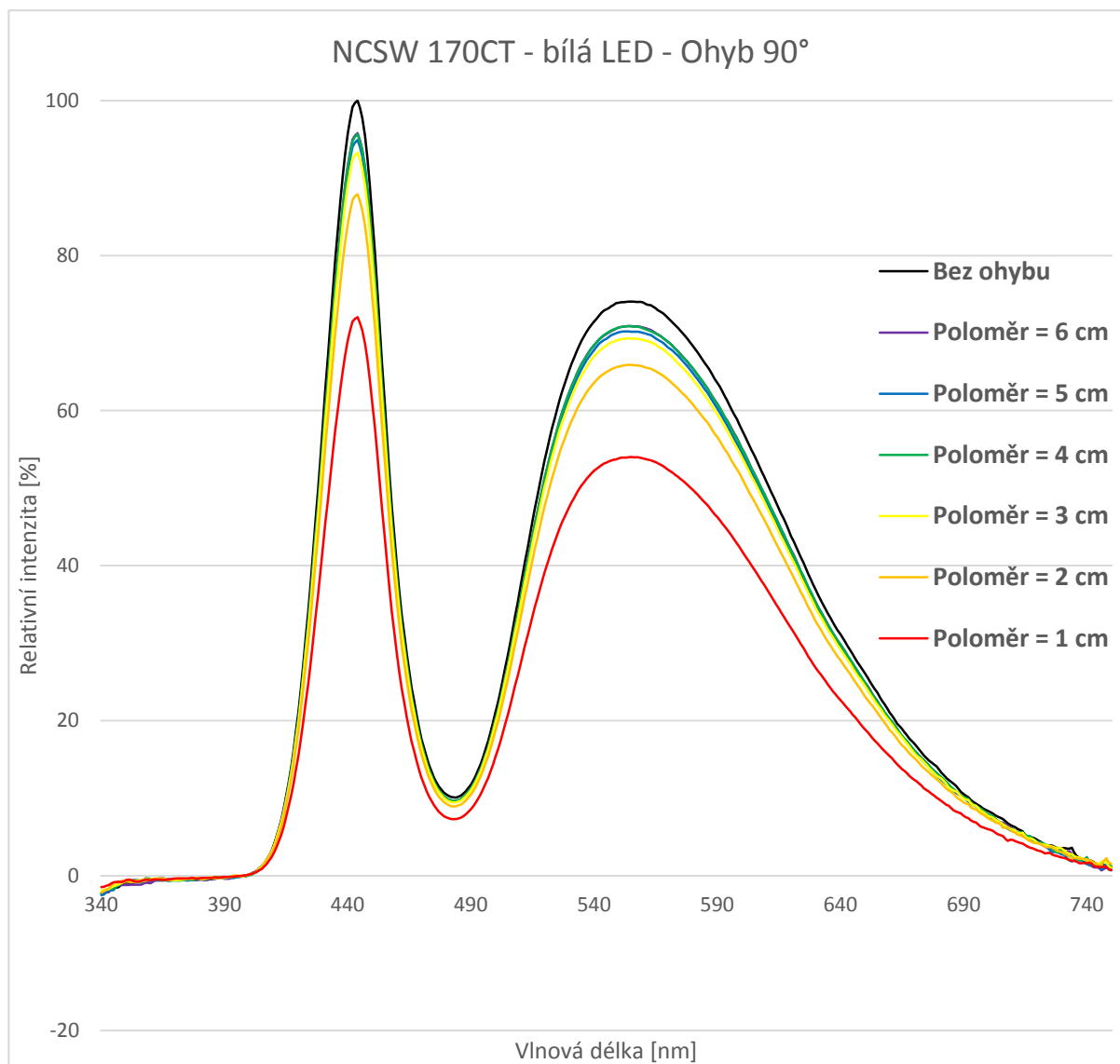
Závislost ztráty výkonu na poloměru ohybu o 90° - Bílá LED			
Vzorek	Výstupní výkon [mW]	Pokles 1 vzorku [%]	Pokles všech vzorků [%]
Bez ohybu	536.64	100.00	100.00
R = 6 cm	510.21	95.08	96.23
R = 5 cm	505.24	94.15	94.82
R = 4 cm	501.56	93.46	93.77
R = 3 cm	493.55	91.97	92.02
R = 2 cm	458.55	85.45	85.91
R = 1 cm	399.21	74.39	74.69

V tabulce lze znovu vidět, že i poměrně velký poloměr ohybu o velikosti 6 cm už má vliv na ztrátu optického výkonu, a to podobně jako u červeného LED zdroje, o **5%**. U hodnot ohybu od 6 do 4 cm dochází sice postupně k vyšším ztrátám optického výkonu, ovšem jsou zde patrné pouze minimální poklesy celkově zhruba o **3%**. Trend se začíná opět měnit u hodnot ohybů 3 – 1 cm. Zde dochází k postupně k čím dál tím výraznějším ztrátám. Od hodnot **92,02%** výstupního výkonu při ohybu o poloměru 3 cm k hodnotám **74,69%** při ohybu o poloměru 1 cm. Zde už lze vidět velmi patrný rozdíl **17,33 %** poklesu výkonu. Celkově pak při ohybu světlovodu o poloměru ohybu 1 cm dochází ke ztrátě **25,31 %** oproti referenčnímu výkonu bez jakéhokoliv ohybu. V obrázku 9.18 lze vidět tytéž výsledky znázorněné křivkou ztrát v bodech ohybů. Tvar křivky opět připomíná exponenciální funkci.



Obrázek 9.18: *Graf křivky ztrát – Bílá LED*

Graf potvrzuje významnou změnu trendu při ohybech o poloměru 3 a méně cm. Ze stejných měření je zde složen i graf spekter (9.19) jednotlivých případů ohybů, kde lze vidět obdobný trend.



Obrázek 9.19: Graf spekter ztrát – Bílá LED

Zde je taktéž možno vidět graf téhož vzorku, který nejvíce odpovídá průměrným hodnotám všech 10ti naměřených vzorků. Spektrum s nejvyšší amplitudou má černou barvu. Představuje naměřené výkonové hodnoty světlovodu před procesem ohýbání. Poté i zde lze pozorovat shluk spekter o poloměrech ohybu s velikostí 6 – 4 cm, kde nedochází téměř k žádným výrazným změnám ztrát. Ovšem změnu trendu lze vidět i zde. U ohybů o 3 cm a méně dochází k výraznému snižování amplitud spekter, což značí výrazné zvyšování ztrát optického výkonu.

Podle předpokladů se opět potvrzuje, že pouhý ohyb světlovodů neovlivňuje posunutí spektra k jiným vlnovým délkám.

9.5.4 Shrnutí výsledků měření ohybových ztrát

Jednotlivá měření dokázala, že vlivem zvyšování poloměrů ohybů se postupně zvyšují i ztráty výkonu na výstupu světlovodu. Tyto postupné ztráty nemají lineární charakteristiku, nýbrž jsou spíše popsatelné exponenciálním charakterem.

Ohybové ztráty mají základy především v geometrických vlastnostech světlovodů, kdy jednotlivé paprsky, putující světlovodem, přestávají splňovat podmínku totálního odrazu uvnitř světlovodu a s narůstajícím poloměrem ohybu se postupně více a více vyvazují ze světlovodu ven a tím dochází ke ztrátě optického výkonu na výstupu světlovodu.

Při pozorném prostudování výsledků ohybových ztrát pro červený a bílý LED zdroj je patrné, že u bílého zdroje vlivem menších ohybů dochází k mírně větším ztrátám výkonu. Nejlépe tento jev lze pozorovat při nejmenším poloměru ohybu o **1 cm**, kde procentuální výstupní výkon ze světlovodu u červeného zdroje odpovídal průměrně hodnotě **76,77 %** referenčního výkonu a u bílého zdroje u stejného ohybu se průměrný výstupní výkon rovnal hodnotě **74,69 %** referenčního výkonu. Jedná se o rozdíl více než **2%** větších ztrát u bílého LED zdroje.

Jelikož červený zdroj působí pouze v úzkém spektru okolo vlnové délky **625 nm**, ale bílý zdroj působí téměř v celém viditelném spektru **400 – 750 nm**, je ovlivňován ohyby jinak mimo jiné z důvodů tzv. **fotoelastického jevu** vyskytujícího se ve světlovodech podléhajících ohybům. Tento fotoelastický jev je funkcí tlaku, mění index lomu světlovodů a to tak, že tam, kde je světlovod vlivem ohybu napínán, se index lomu zmenšuje a tam, kde je světlovod vlivem ohybu stlačován, index lomu roste. Jelikož se v bílém světle vyskytuje celá škála vlnových délek, tak se pro tyto paprsky, vlivem těchto změn indexů lomu, různě mění jejich trajektorie, což má v našem případě za následek větší procento vyvázání paprsků ze světlovodu a tím zvýšení ztrát optického výkonu.

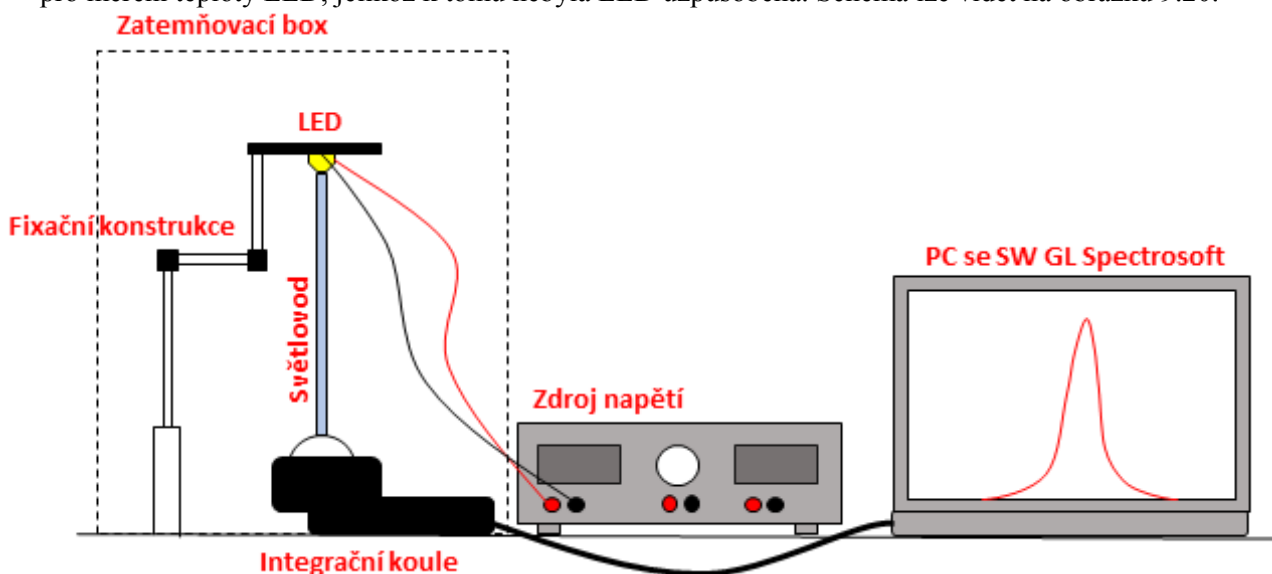
Zbývá měření je možno nalézt v příloze v příloženém DVD.

9.6 Měření konverze modrého světla luminofory

Posledním typem měření v této práci je přeměna barvy světla modrého LED zdroje na bílý výstup po průchodu světlovody z materiálu PDMS pomocí luminoforu. K tomuto měření byl použit jeden výkonový modrý LED zdroj SX LD CN5M. Hodnota stálého pracovního proudu I_f byla nastavena na **250 mA**. Pro měření jsem používal 5 světlovodů s různě velkou šířkou luminoforu na jejich konci. Měření probíhalo tak, že jsem do fixační konstrukce upevnil světlovod nejprve vrstvou luminoforu dole a změřil jsem výsledky. Poté jsem světlovod otočil a upevnil jej vrstvou luminoforu rovnou ke zdroji, druhý konec zase vložil do ústí integrační koule a změřil. Takto měření proběhlo pro všech 5 vzorků.

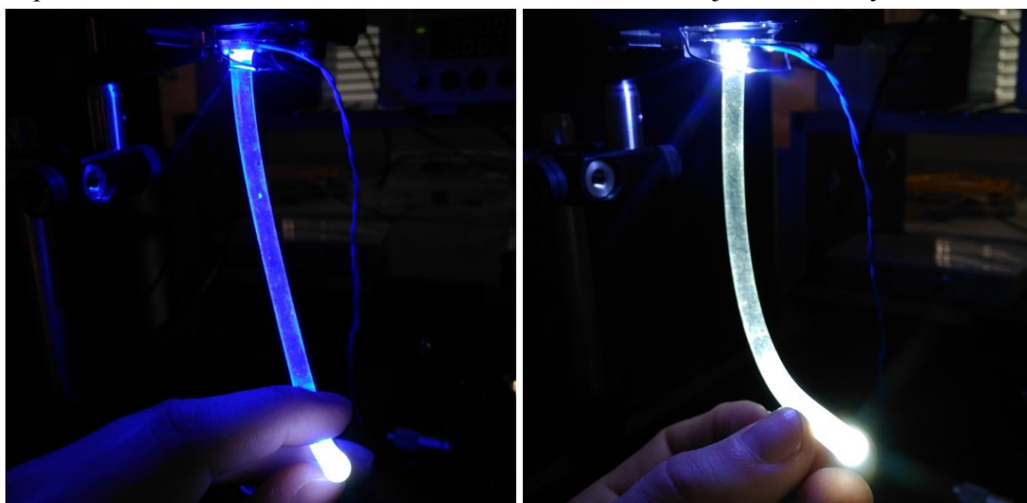
9.6.1 Popis měřicího pracoviště

Stavba a rozložení měřicího pracoviště byla téměř totožná s měřicím pracovištěm pro měření útlumu v první kapitole měření. Změnil se pouze zdroj na modrou LED a nepoužíval jsem multimetr pro měření teploty LED, jelikož k tomu nebyla LED uzpůsobena. Schéma lze vidět na obrázku 9.20.



Obrázek 9.20: Schéma měřicího pracoviště s luminoforem

Pro větší přehlednost a ucelenost zde na dalším obrázku 9.21 ukazují obě varianty zmíněného měření.



Obrázek 9.21: Vlevo luminofor na konci, vpravo na začátku světlovodu

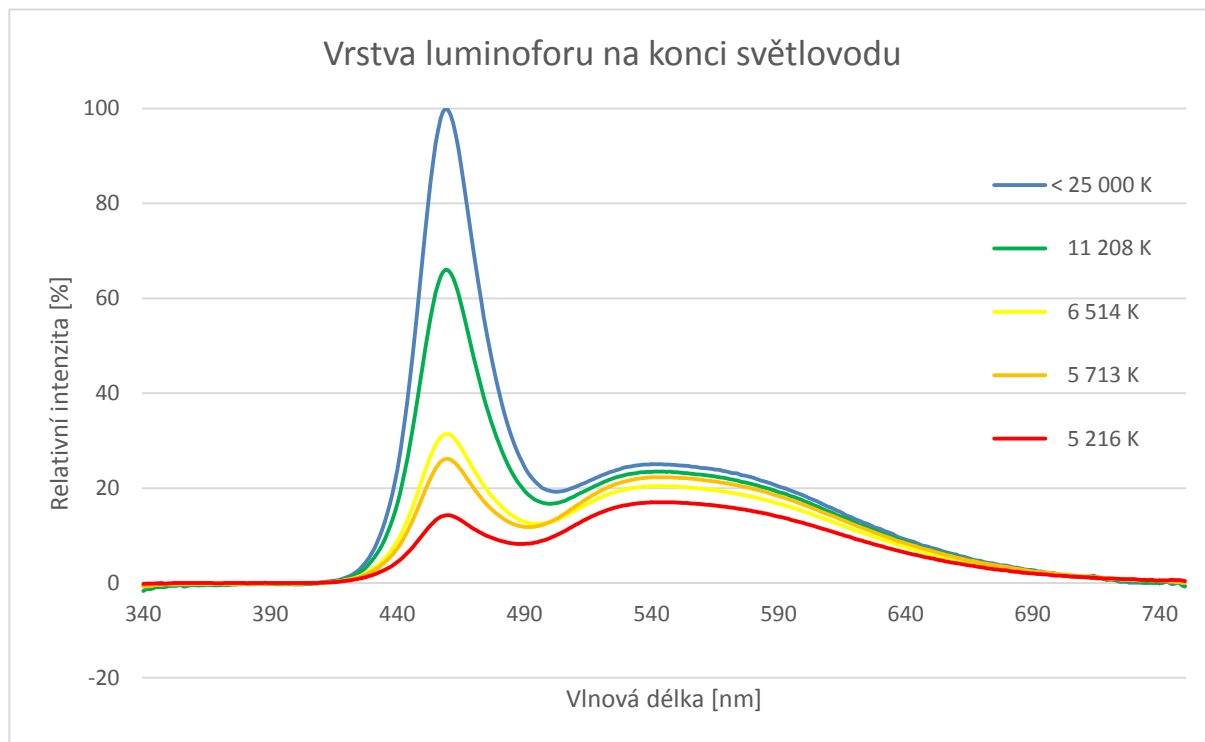
9.6.2 Výsledky měření s luminoforem na konci světlovodu

Modré světlo ze zdroje v tomto případě putovalo celým světlovodem až na jeho konec, kde narazilo na luminofor a ten jistou část absorboval a konvertoval na světlo žluté barvy a všesměrově vyzařil. Druhou část modrého světla neabsorboval a toto světlo jím prošlo dále. Poměrem těchto dvou složek světla pak vzniká bílé světlo s odpovídající hodnotou teploty chromatičnosti podle poměrů obou složek světla. Před samotným měřením se vzorky s luminoforovými vrstvami byl naměřen výkon na výstupu světlovodu bez zmíněných vrstev. Tento výkon se rovnal hodnotě **105,01 mW**, což odpovídá hodnotě světelného toku **5,47 lm**. Tabulka číslo 9.11 zobrazuje naměřené hodnoty světlovodů.

Tabulka 9.11: *Tabulka naměřených hodnot – luminofor na konci světlovodu*

Číslo vzorku	Velikost vrstvy [mm]	Výkon na výstupu [mW]	Světelný tok na výstupu [lm]	CCT [K]
1	2	38.26	9.57	< 25 000
2	2.3	30.82	8.7	11 208
3	2.6	22.37	7.84	6 514
4	2.9	22.19	7.3	5 713
5	3	16.19	5.93	5 216

Z tabulky lze vyčíst, že se zvětšující se vrstvou luminoforu klesá výstupní výkon, tedy i světelný tok. Spolu s těmito hodnotami se snižuje i naměřená teplota chromatičnosti. Vzorek s velikostí vrstvy luminoforu **2 mm** má výstupní výkon roven **38,26 mW**, ale teplota chromatičnosti přesahuje **25 000 K**, což je stále ještě velmi modré světlo. V opačném případě lze pozorovat, že vzorek s **3 mm** vrstvou má výstupní výkon **16,19 mW**, ale teplota chromatičnosti dosahuje hodnot **5 216 K**, což už je poměrně příjemná bílá s velmi jemnými tóny žluté barvy. Graf spekter 9.22 měření vizualizuje.

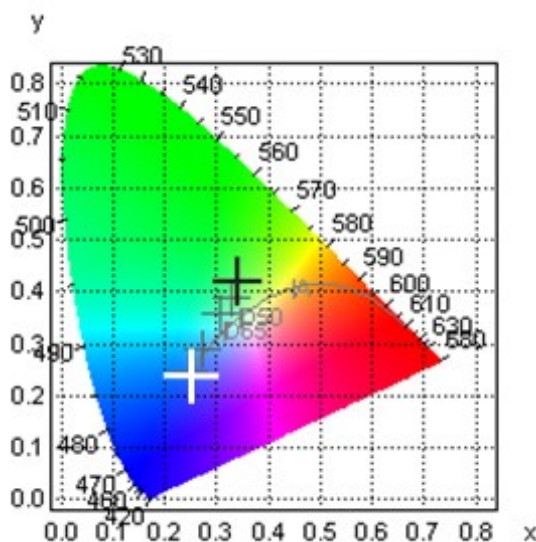


Obrázek 9.22: *Graf spekter jednotlivých světlovodů s luminoforem na konci*

Ze spektrálního grafu jde velmi dobře vidět, jaký vliv má poměr modré a žluté složky světla na výslednou barvu chromatičnosti. V prvním případě modré křivky, kdy byla naměřena hodnota CCT byla větší než **25 000 K**, lze vidět, že ve spektru dominuje modrá složka s vrcholem amplitudy zhruba na vlnové délce **460 nm**. Toto spektrum obsahuje i žlutou složku s vrcholem amplitudy zhruba na vlnové délce **550 nm**, ovšem ta je v porovnání s modrou složkou několikanásobně menší. Tento nepoměr vytváří takto vysoké hodnoty teploty chromatičnosti.

Pokud se však podíváme na spektrum znázorněné červenou barvou s hodnotou CCT **5 216 K**, můžeme sledovat, že poměr dvou výše zmíněných složek se výrazně změnil. Z grafu se dá říci, že zde naopak žlutá složka světla začala být mírně dominantnější. To se neprojevilo pouze změnou barvy chromatičnosti ale také celkovou ztrátou intenzity, tedy výrazným snížením výstupního výkonu.

Na následujícím obrázku 9.23 lze vidět chromatický diagram CIE 1931, ve kterém jsou znázorněny polohy odstínu barev získaných při měření světlovodů z PDMS s luminoforovými vrstvami.



Obrázek 9.23: Umístění výsledků měření vzorků s luminoforem na konci v chromatickém diagramu

V chromatickém diagramu lze dohledat kde se jednotlivé výsledky měření světlovodů s luminoforem a jejich teplotou chromatičnosti nacházejí.

Zvýrazněný černý kříž odkazuje na umístění hodnoty spektra světlovodu s naměřenou teplotou chromatičnosti **5 216 K**. Zde lze vidět, že barva bílého světla zde již poměrně značně zachází do zelených odstínů. Čím více se hodnota teploty chromatičnosti zvětšuje, tím více se poloha umístění jednotlivých vzorků pohybuje směrem do levého spodního rohu diagramu k ryze modrým odstínům. Značkou bílého kříže je označena druhá krajní hodnota teploty chromatičnosti větší než **25 000 K**. Ostatní 3 výsledky se pak nacházejí mezi nimi.

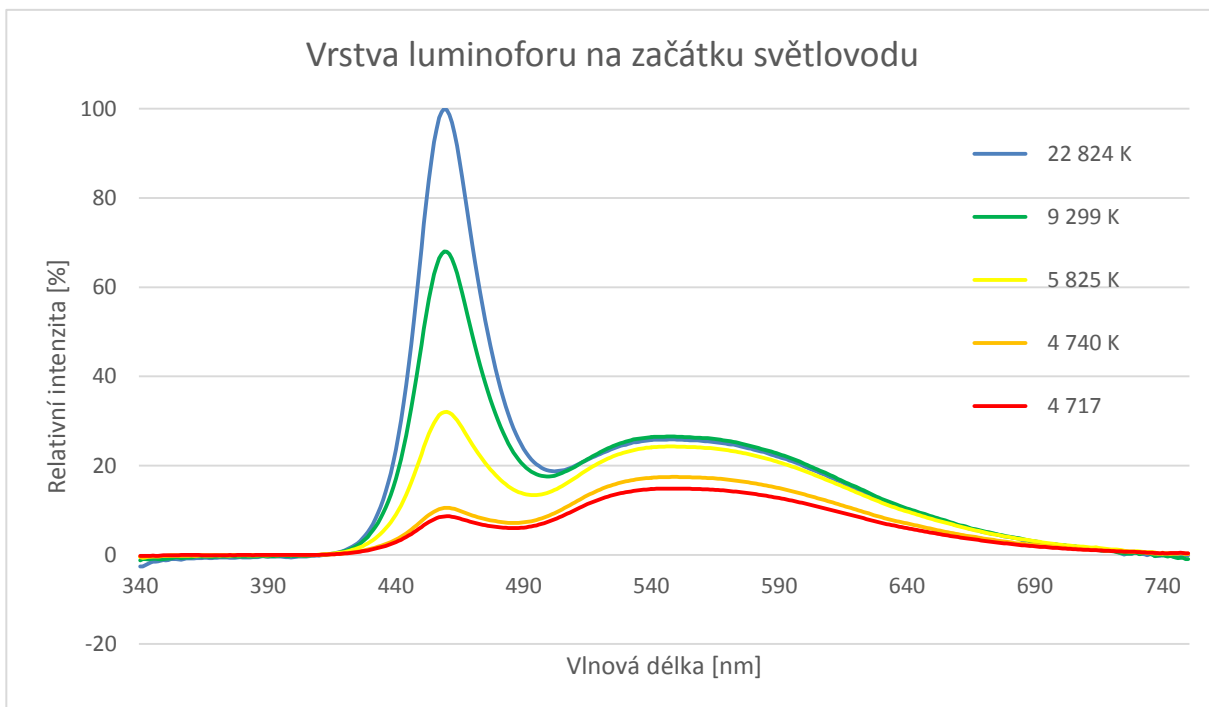
9.6.3 Výsledky měření s luminoforem na začátku světlovodu

Oproti minulému případu, zde došlo ke konverzi světla modrého na bílé již na samotném začátku světlovodu, protože vrstva luminoforu byla umístěna hned na čele světlovodu. Došlo ke stejnému jevu jako v minulém případě. Hodnoty teploty chromatičnosti znovu určoval poměr obou složek světla ovšem s jinými poměry než v předchozím měření. Tím bylo dosaženo toho, že světlo již bílé barvy putovalo celým světlovodem až na konec. Před samotným měřením se vzorky s luminoforovými vrstvami byl zde ovšem naměřen výkon zdroje. Tento výkon se rovnal hodnotě **308,82 mW**, což odpovídá hodnotě světelného toku **16,29 lm**. Tabulka číslo 9.12 hodnoty zobrazuje.

Tabulka 9.12: *Tabulka naměřených hodnot – luminofor na začátku světlovodu*

Číslo vzorku	Velikost vrstvy [mm]	Výkon na výstupu [mW]	Světelný tok na výstupu [lm]	CCT [K]
1	2	43.19	11.06	22 824
2	2.3	37.61	10.97	9 299
3	2.6	28.57	9.7	5 825
4	2.9	17.68	6.79	4 740
5	3	15.07	5.78	4 717

Z tabulky lze vyčíst, podobný trend výskytu a velikosti naměřených hodnot. Z rostoucí velikostí vrstvy klesá výstupní optický výkon i teplota chromatičnosti. Vzorek s velikostí vrstvy luminoforu **2 mm** má výstupní výkon roven **43,19 mW**, ale teplota chromatičnosti odpovídá **22 824 K**, což je stále ještě velmi modré světlo. V opačném případě lze pozorovat, že vzorek s **3 mm** vrstvou má výstupní výkon **15,07 mW**, ale teplota chromatičnosti dosahuje hodnot **4 717 K**, což už je bílá s poměrně znatelnými tóny žluté barvy. Graf spekter 9.24 měření vizualizuje.

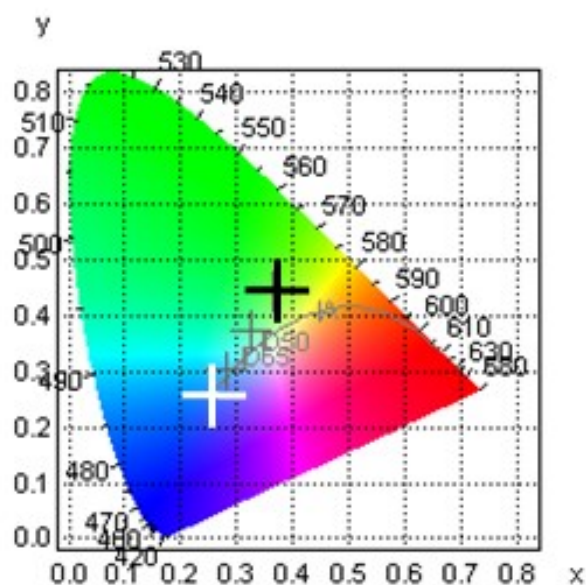


Obrázek 9.24: *Graf spekter jednotlivých světlovodů s luminoforem na začátku*

Ze spektrálního grafu jde znovu vidět, jaký vliv má poměr modré a žluté složky světla na výslednou barvu chromatičnosti. V prvním případě znázorněné modré křivky, kdy byla naměřena hodnota CCT rovnající se **22 824 K**, lze opět vidět, že ve spektru dominuje modrá složka s vrcholem amplitudy zhruba na vlnové délce **460 nm**. Toto spektrum obsahuje i žlutou složku s vrcholem amplitudy zhruba na vlnové délce **550 nm**, ovšem ta je v porovnání s modrou složkou velmi malá. Tento nepoměr vytváří takto vysoké hodnoty teploty chromatičnosti.

Pokud se však podíváme na spektrum znázorněné červenou barvou s hodnotou CCT **4 717 K**, můžeme sledovat, že poměr dvou výše zmíněných složek se výrazně změnil. Z grafu se dá říci, že zde naopak žlutá složka světla začala být výrazněji dominantnější. To se neprojevilo pouze změnou barvy chromatičnosti, ale také celkovou ztrátou intenzity, tedy výrazným snížením výstupního výkonu

Na následujícím obrázku 9.25 lze vidět chromatický diagram CIE 1931, ve kterém jsou umístěny polohy odstínů barev získaných při měření světlovodů z PDMS s luminoforovými vrstvami.



Obrázek 9.25: Umístění výsledků měření vzorků s luminoforem na začátku v chromatickém diagramu

V chromatickém diagramu lze dohledat kde se jednotlivé výsledky měření světlovodů s luminoforem a jejich teplotou chromatičnosti nacházejí.

Zvýrazněný černý kříž odkazuje na umístění hodnoty spektra světlovodu s naměřenou teplotou chromatičnosti **4 717 K**. Zde lze vidět, že barva bílého světla zde ještě výrazněji zachází do zelených odstínů. Čím více se hodnota teploty chromatičnosti zvětšuje, tím více se poloha umístění jednotlivých vzorků pohybuje směrem do levého spodního rohu diagramu k ryze modrým odstínům. Značkou bílého kříže je označena druhá krajní hodnota teploty chromatičnosti rovnající se **22 824 K**. Ostatní 3 výsledky se pak nacházejí mezi nimi.

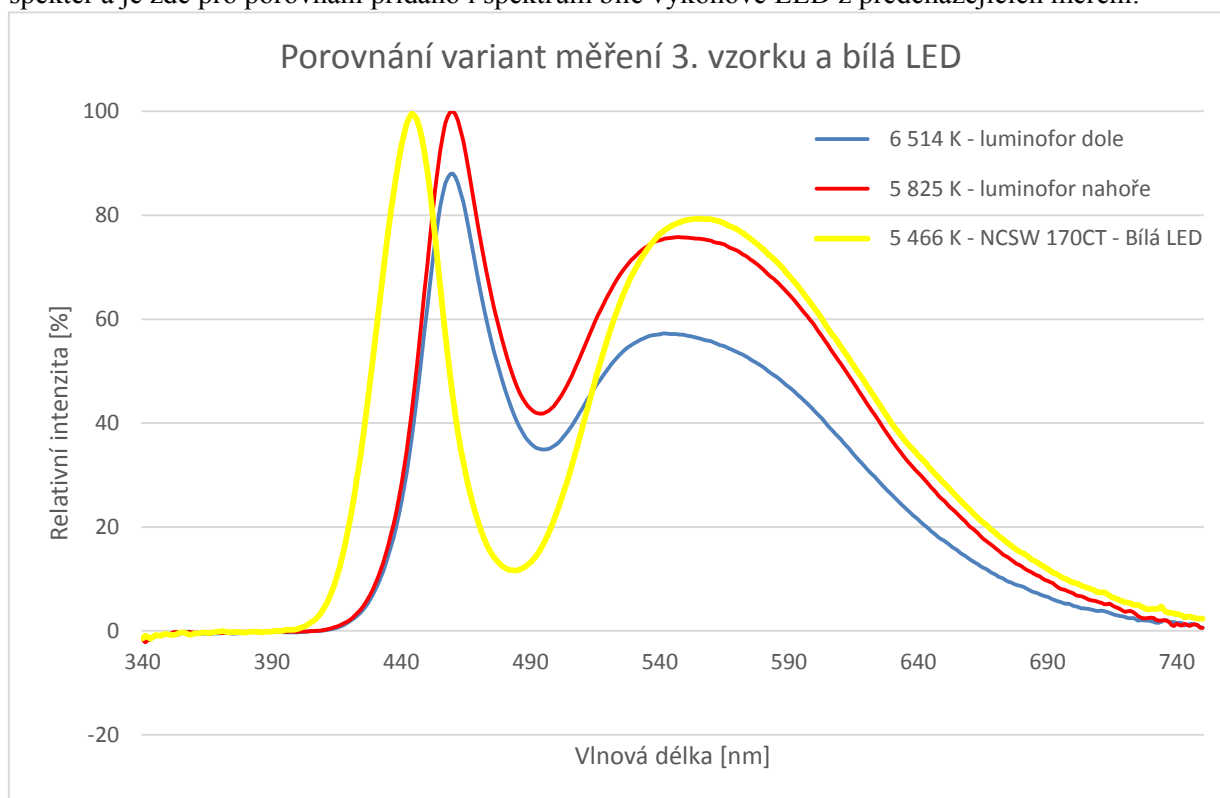
9.6.4 Porovnání obou typů měření na vybraném vzorku

Jelikož z hlediska přehlednosti není možné porovnávat všech 5 kusů obou variant měření najednou, vybral jsem hodnoty jednoho vzorku a na něm popisuji odlišnosti. Jedná se, z předchozích tabulek, o světlovod s vrstvou luminoforu o velikosti zhruba **2,6 mm**, jež v obou případech vykazuje hodnotu teploty chromatičnosti okolo **6 000 K**. Tuto hodnotu můžeme označovat za hraniční v tom ohledu, že představuje jakýsi mezník kdy nižší hodnoty CCT bílého světla se zabarvují do teplejších více žlutých barev a vyšší hodnoty postupně nabývají odstínu barvy modré.

Tabulka 9.13 zobrazuje hodnoty světlovodů měřené s různým umístěním vrstvy luminoforu.

Číslo vzorku	Poloha vrstvy	Velikost vrstvy [mm]	Výkon na výstupu [mW]	Světelný tok na výstupu [lm]	CCT [K]
3	Na konci	2.6	22.37	7.84	6 514
3	Na začátku	2.6	28.57	9.7	5 825

Přestože měl vzorek vždy stejný zdroj emitující světlo o stále stejném výkonu, výsledky jsou rozdílné. Ukázalo se, že efektivnější z hlediska ztrát výkonu je varianta, kdy dojde ke konverzi modrého světla na bílé již hned u zdroje. Dokládají to hodnoty výstupního výkonu světlovodu s luminoforem na konci, které činí **22,37 mW** v porovnání s výstupním výkonem světlovodu s luminoforem na začátku, které činí **28,57 mW**. V první variantě měření pak teplota chromatičnosti odpovídá hodnotě **6 514 K** a v druhé variantě měření teplota chromatičnosti je rovna hodnotě **5 825 K**. Podle pomyslného mezníku, jedno světlo může být již považováno za to se studenými barevnými tóny a to druhé již za světlo s teplými barevnými tóny. Následující graf 9.26 vizualizuje oba případy výše zmíněné pomocí odpovídajících spekter a je zde pro porovnání přidáno i spektrum bílé výkonové LED z předcházejících měření.



Obrázek 9.26: Spektrální graf 3. vzorku dvou variant měření a bílé výkonové LED

Spektrální graf potvrzuje, že vzorek světlovodu s vrstvou luminoforu nahoře přímo u zdroje dosahuje větších intenzity a výstupního výkonu než v případě pokud je vrstva luminoforu až dole u ústí do detektoru.

Pro názornost jsem do grafu proporcionálně uvedl i spektrum bílé výkonové LED, kterou jsem používal ve všech ostatních předešlých měřeních. Tvar křivek bílé LED a světlovodů jsou si podobné. U originální bílé výkonové LED je ovšem vidět mnohem větší propad složek spektra okolo vlnové délky **490 – 500 nm**, což jsou vlnové délky odpovídající odstínům zelené barvy. Jelikož světlovody s luminoforem obsahují i podle uvedeného spektrálního grafu více této složky zelených odstínů, jsou v chromatickém diagramu stahovány více do zelené oblasti tohoto diagramu. K tomuto celému i přispívá fakt, že celá amplituda vykazující modrou složku spektra bílé barvy je spektrálně posunuta zase směrem k zeleným odstínům oproti výkonové bílé LED a to zhruba o **25 nm**.

9.6.5 Shrnutí výsledků konverze modrého světla luminoforů

Měření dokázalo, že lze vyrobit světlovody z materiálu PDMS s vrstvou luminoforu za účelem barevné konverze modré barvy na bílou. Bylo změřeno 5 vzorků s různě velkou vrstvou luminoforu vykazující rozdílné hodnoty teploty chromatičnosti na výstupu. Tyto hodnoty CCT se pohybovaly od více než **25 000 K** po nejméně **4 717 K**.

Měření probíhalo dvěma způsoby. První byl takový, že světlovod byl měřen s vrstvou luminoforu na konci a druhý způsob byl opačný. Světlovod měl vrstvu luminoforu rovnou u LED zdroje. Ukázalo se, že k menším ztrátám výkonu dochází, když je luminofor umístěn přímo u zdroje. Tato aplikace vykazuje jak menší ztráty výkonu, tak ale i menší hodnoty teploty chromatičnosti. Jelikož luminofor modré světlo absorbuje a poté všesměrově distribuuje do okolí, pro větší efektivnost celého tohoto konceptu by bylo na místě světlovod hned u zdroje obalit materiálem s vysokou odrazivostí, aby velkou část světla vyzářenou do okolí usměrnil zpět do světlovodu.

Bylo také zjištěno, že vzorek číslo 3 vykazuje velmi podobnou hodnotu teploty chromatičnosti rovnající se **5 825 K** s teplotou chromatičnosti originálního výkonového LED zdroje **5 466 K** použitého v předešlých měřeních. U bílého LED zdroje a vzorku dochází taktéž k velké podobnosti i ve spektrální charakteristice.

Zbývá měření je možno nalézt v příloze v přiloženém DVD.

Závěr

Tato diplomová práce ve své teoretické části pojednává o světle jako o elektromagnetickém vlnění ve viditelném spektru. Věnuje se problematice geometrické optiky především v souvislosti se šířením světla ve světlovodech. Popisuje jakým způsobem jsou aplikovány světlovody v automobilovém průmyslu a taktéž rozebírá jak dochází ve světlovodech ke ztrátám optického výkonu formou popisu absorpčních, ohybových, rozptylových ztrát a celkového útlumu. Věnuje se taktéž objektivním i subjektivním způsobům posuzování světla a barev ve spojitosti s vnímáním světla lidským okem a vyhodnocování světla exaktně pomocí nástrojů kolorimetrie. Pojednává o fotometrických a radiometrických veličinách. V neposlední řadě se věnuje technologii LED s důrazem na aplikování v automobilovém průmyslu. Dále rozebírá problematiku luminoforů a princip, kterým konvertují světlo. V poslední teoretické části se věnuje materiálu s názvem Polydimethylsiloxan (PDMS) především z hlediska optických a mechanických vlastností a využití.

V praktické části se tato práce věnuje zkoumání široké škále vlastností výše zmíněného polymerního materiálu PDMS a to jak optických tak mechanických. Je zde přehledně a podrobně popsán celý proces postupu a vývoje výroby světlovodů vytvořených z PDMS od jeho počátku po konečné kvalitní výsledné vzorky, včetně výroby vzorků s vrstvou luminoforu na koncích světlovodů. Je zde provedena série 4 typů měření, které postupně odhalují vlastnosti a parametry světlovodů z PDMS. V těchto měřeních jsou jako světelné zdroje použity výkonové LED standardně používané v automobilovém průmyslu pro plnění signálních funkcí. Konkrétně se jedná o červenou LED s označením KR DMLN 31.23 a oranžovou LED s označením KY DMLN 31.23 od firmy OSRAM a o bílou výkonovou LED s označením NCSW 170CT od firmy NICHIA. Při měření konverze modrého světla na bílé je použita modrá výkonová LED s označením SX LD CN5M znovu od společnosti OSRAM.

První měření bylo věnováno zjišťování měrného útlumu PDMS světlovodů, posuvu vlnové délky při průchodu světla světlovodem a výpočtu absorpčního koeficientu. Měření ukázalo, že nej kvalitnější vzorky vykazují měrný útlum 0,19 dB/cm a hodnota absorpčního koeficientu se u těchto vzorků pohybuje okolo $0,0425\text{ m}^{-1}$. Bylo taktéž zjištěno, že po průchodu světla světlovody z PDMS nedochází k žádnému spektrálnímu posuvu, pouze se mění výkon na výstupu světlovodu. Tento fakt dokazuje teoretický předpoklad, že PDMS je materiál opticky čistý. S kvalitou zpracování vzorků se i měnila teplota chromatičnosti u bílého LED zdroje. U nekvalitních vzorků docházelo k většímu rozptylu nižších vlnových délek vlivem většího počtu nehomogenit ve formě vzduchových mikro bublinek, což mělo za následek výrazné snížení teploty chromatičnosti z hodnoty LED zdroje činící 5 466 K na hodnotu 5 189 K u kvalitních vzorků a na hodnotu 4 638 K u nekvalitních vzorků.

Druhé měření bylo věnováno vlivu změny teploty prostředí na optické vlastnosti světlovodů. Měření ukázalo, že existuje pouze velmi malý pokles výkonu vlivem změny teploty z 25 °C na 70 °C a to pouze o zhruba 1%. Tento pokles však ve většině aplikací v praxi je téměř zanedbatelný. Měření prokázalo, že opět nedochází k žádnému posuvu vlnových délek spektra světla po průchodu světlovody ani za zvýšené teploty okolí, což potvrzuje teoretický předpoklad, že PDMS je materiál teplotně velmi stálý a stabilní. Tento fakt lze však s určitostí říci pouze pro teploty okolo 70 °C, nelze toto tvrzení extrapolovat vzhledem k vyšším teplotám.

Třetí měření rozšiřovalo základní zadání práce a zabývalo se ohybovými ztrátami ve světlovodech. Bylo potvrzeno, že vliv ohybů s konstantně se zmenšujícím poloměrem ohybu může být popsán exponenciální charakteristikou odezvy výkonových ztrát na výstupu světlovodu. Při ohybech o poloměru 1 cm byla zjištěna ztráta výkonu o průměrné velikosti 25%. Však bílý LED zdroj byl ovlivňován menšími poloměry ohybů více než červený LED zdroj vlivem jeho spektrálního složení v kombinaci s fotoelastickým jevem vyskytujícím se v ohybem namáhaných světlovodech.

Poslední měření bylo věnováno přeměně modrého světla emitovaného výkonovým LED zdrojem na bílé světlo pomocí luminoforové vrstvy na čele světlovodu. Měřením a výsledky bylo dokázáno, že tento koncept je v praxi proveditelný. Bylo dosaženo celé škály hodnot teplot chromatičnosti na výstupu světlovodů, od hodnot překračujících 25 000 K až po hodnoty 4 717 K. Měření ukázalo, že efektivnější způsob jak konvertovat modré světlo na bílé tímto způsobem je tak, že vrstva luminoforu je již na čele světlovodu, nikoliv na jeho výstupu a k přeměně dochází hned u zdroje. U jednoho vzorku bylo dosaženo velmi podobné spektrální charakteristiky jako u LED výkonového zdroje reálně používaného v praxi. V tomto případě se i podobaly hodnoty teplot chromatičnosti u vzorku rovnající se 5 825 K a u reálné bílé LED 5 466 K.

Měření tedy prokázalo a potvrdilo teoretické předpoklady, že materiál PDMS je značně opticky čistý a teplotně stálý. Je vhodný pro výrobu světlovodů a jiných optických prvků a díky jeho optickým a flexibilním vlastnostem má, po dalším zdokonalení výroby, potenciál pro aplikování v praxi, například v automobilovém průmyslu.

Při vytváření této práce jsem dospěl k závěru, že nejdominantnějším útlumovým činitelem ve mnou zhotovených světlovodech jsou rozptylové ztráty. Jelikož jsem neměl možnost pracovat v naprosto čistém prostředí nebo v čisté komoře, ve vzorcích jdou občas i pouhým okem spatřit prachové částičky či jiné druhy nečistot způsobené nedostatečně čistým prostředím při míchání PDMS směsi. Proto pokud je cílem zvyšování kvality vzorků je nutno tuto skutečnost v budoucnu zajistit.

Pro ještě razantnější snížení vnitřních nehomogenit světlovodů ve formě okem nespátřitelných vzduchových mikro bublin by bylo v budoucnu vhodné do výrobního procesu implementovat ultrazvukovou lázeň na takové frekvenci, která by změnila velikost zmíněných vnitřních mikro bublin na takové velikosti, jež by mnohem méně ovlivňovaly svou geometrií trajektorii paprsků, čímž by se znovu snížily ztráty optického výkonu.

Posledním poznatkem je fakt, že i kvalitní vzorky vykazovaly jistou míru lepkavosti a přilnavosti k okolním materiálům. Vlivem tohoto jevu na světlovody přilnou různé okolní nečistoty, jež znovu zvýší výkonové ztráty. V průběhu měření bylo zjištěno, že čistý světlovod může vykazovat až o 15 % vyšší výkon na výstupu než světlovod s nečistotami. Pro další zkvalitnění výsledných vzorků je tedy třeba na světlovody aplikovat jistý transparentní antistatický povlak, ideálně s nižším indexem lomu než má PDMS, který by sloužil jako sekundární ochrana a bránil by tak nečistotám udržovat se na povrchu. Tato povrchová úprava by pomohla i v případech kdy by bylo třeba světlovod někde upevnit, či obejmou, aby na rozhraní dvou prostředí nedocházelo k razantní změně indexu lomu, ale povlaková vrstva navíc by zajistila odraz paprsků již od rozhraní mezi povlakem a samotným světlovodem podobně jako je tomu u optických vláken.

Použitá literatura

- [1] OLBRECHT, Jan. Světlo jako elektromagnetické vlnění [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2015/FY2BP_KOS2/60555686/Svetlo_jako_elektromagneticke
- [2] AUTOR NEUVEDEN. <http://archive.luxmagazine.co.uk> [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: <https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-9b0f5e351553794ca2bb3cad7e548fa1.webp>
- [3] VITÁSEK Jan. Optické atmosférické komunikace [online]. 2017 [2018-04-04]. Skripta. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [4] KUMMER, Jiří. Studium komunikace mezi vozidly s využitím LED technologií [online]. 2015 [cit. 2018-04-04]. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2015. Vedoucí práce: Koudelka, Petr.
- [5] AUTOR NEUVEDEN. <https://physics.stackexchange.com> [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: <https://i.stack.imgur.com/yzgns.png>
- [6] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-5--15722>
- [7] ŠÍŠKA, Petr. Optoelektronika [online]. 2014 [cit. 22.4.2018] Skripta. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [8] VAŠÍNEK, Vladimír. Optické komunikace 1 pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO [online]. 2014 [cit. 2018-04-04]. Skripta. Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2014. ISBN 978-80-248-3675-1
- [9] SLÁMA, Pavel. Vliv teploty na světelně-technické parametry LED [online] 2015 [cit. 2018-04-04] Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2015. Vedoucí práce: Pavelka, Tomáš.
- [10] KITRONIK. www.kitronik.co.uk/ [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: <https://www.kitronik.co.uk/3590-yellow-candle-5mm-water-clear-led-30deg-5800mcd.html>
- [11] LUMITRONIX. www.lumitronix.com [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: https://www.lumitronix.com/en_gb/nichia-ncswel7at-smd-led-with-pcb-10x10mm-148lm-5000k-cri-80-65502.html
- [12] ŠÍŠKA, Petr. Nekomunikační aplikace optických vláken [online]. 2015 [2018-04-04]. Skripta. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [13] NICHIA. <http://www.nichia.co.jp> [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupný na WWW: <http://www.nichia.co.jp/img/product/led/photo/NCSW170A.jpg>
- [14] ELIAS, Paulo Roberto. webinsider.com.br [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: <https://webinsider.com.br/lcd-avanca-com-novas-tecnologias-no-backlight/>

- [15] AUTOR NEUVEDEN. <http://www.aldebaran.cz> [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2014_33/LED_princip.png
- [16] VÁCLAVÍK, Adam. Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS) [online]. 2016 [cit. 2018-04-04]. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2016. Vedoucí práce: Šiška, Petr.
- [17] NOVÁK, Martin. Studium optických vlnovodů z polydimethylsiloxanu [online]. 2015 [cit. 2018-04-04]. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015. Vedoucí práce: Vašínek, Vladimír.
- [18] SMOKEFOOT. <https://commons.wikimedia.org> [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupný na WWW: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PmdsStructure.png>

Seznam příloh

Součástí DP je DVD.

Adresářová struktura přiloženého DVD:

1. Složka - Fotografie světlovodů
2. Složka - Fotografie pracovišť
3. Složka - Výsledky měření útlumů
4. Složka - Výsledky měření teplotních závislostí
5. Složka - Výsledky měření ohybových ztrát
6. Složka - Výsledky měření konverze světla